

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 539.37

О ВЛИЯНИИ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА УГЛЯ НА МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЕ В ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ

А. А. Ордин¹, А. М. Тимошенко²

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

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

Приведены фактические и теоретические доказательства снижения абсолютного метановыделения из разрабатываемого угольного пласта при высоких скоростях подвигания очистного забоя. Обоснована параболическая зависимость метановыделения от скорости подачи и производительности очистного комбайна.

Шахта, угольный пласт, фракционный состав, сортность угля, метановыделение, скорость подвигания очистного забоя

По результатам наблюдений средствами аэрогазового контроля на ряде шахт Кузбасса и Донбасса установлено, что при высоких скоростях подвигания очистного забоя абсолютное метановыделение значительно снижается [1–3]. Так, на шахте “Котинская” при увеличении добычи угля в очистном забое с 15000 до 30000 т/сут абсолютное метановыделение из разрабатываемого пласта снизилось с 8.0 до 4.5 м³/мин [2], а на шахте им. А. Ф. Засядько при увеличении добычи угля в забое с 2500 до 4000 т/сут дебит метана снижался с 15 до 7 м³/мин [3].

Объяснение этому явлению дано в [1] и заключается в том, что при высокой скорости и производительности очистного комбайна изменяется фракционный состав отбитого угля в сторону повышения выхода крупных фракций и соответствующего снижения объема мелких частиц. В результате снижается суммарная площадь поверхности частиц угля и в соответствии с законом Дарси пропорционально уменьшается дебит метана из угольной массы. Кроме того, при высокой производительности очистного комбайна и лавного скребкового конвейера метан из отбитого угля удаляется быстрее, чем накапливается [4].

По существующим методикам [5–8] расчета вентиляции очистных забоев абсолютное метановыделение из разрабатываемого пласта возрастает с увеличением производительности очистного комбайна по формуле

$$I_{\text{пл}} = \frac{XK_{\text{пл}}A_c}{1440} (K_{\text{ту}} + K(1 - K_{\text{ту}})e^{-n_1v}), \quad (1)$$

где $I_{\text{пл}}$ — метановыделение из пласта, м³/мин; X — природная газоносность разрабатываемого пласта, м³/т; $K_{\text{пл}}$ — коэффициент дренирования пласта, учитывающий влияние системы разработки; A_c — расчетная производительность очистного комбайна, т/сут; $K_{\text{ту}}$ — коэффициент, учитывающий степень дегазации отбитого угля при его транспортировании по выработкам

участка; K — коэффициент, характеризующий газоносность пласта на кромке свежесобранного забоя; n_1 — коэффициент, характеризующий газоотдачу пласта через обнаженную поверхность очистного забоя; v — скорость подвигания очистного забоя, м/сут.

Практическое использование зависимости (1) для расчета метановыделения из разрабатываемых пластов выявляет следующие ее особенности и соответствующие недостатки.

Суточная производительность очистного забоя переводится в минутную путем деления на общее количество минут в сутках ($24 \cdot 60 = 1440$ мин). Однако в ремонтную смену добыча угля не производится и соответственно в эту смену снижается метановыделение в очистном забое. Поэтому использование формулы (1) уменьшает расчетное метановыделение в очистном забое по сравнению с фактическим. Так, при организации очистных работ в две рабочие смены продолжительностью 7 ч длительность выемки угля составляет 840 мин, а фактическое метановыделение в добычные смены превышает расчетное по (1) в 1.66 раза!

В формуле (1) не учитывается фракционный состав отбитого очистным комбайном угля. Метановыделение в (1) рассчитывается по природной газоносности угольного пласта. Известно, что значительное количество метана остается в горной массе по всей транспортной цепочке вплоть до обогатительной фабрики. Для того чтобы оценить метановыделение в очистном забое, следует в формуле (1) от природной газоносности вычесть остаточную метаносность угля, определяемую по действующим инструкциям [5–8].

Метановыделение в очистном забое рассчитывается в [8] по максимальной скорости подачи и по максимальной производительности очистного комбайна. Это, на наш взгляд, не совсем корректно. Фактическая скорость движения очистного комбайна зависит от его мощности, сопротивляемости угля резанию, наличия породных прослоек, угла падения пласта и других факторов [9, 10], поэтому фактическая скорость и производительность очистного комбайна всегда меньше своих паспортных максимальных значений. Кроме того, производительность очистного забоя может ограничиваться пропускной способностью лавного скребкового конвейера, скоростью передвижки секций механизированной крепи и газовым фактором.

Следует также добавить, что в формуле (1) скорость подвигания очистного забоя является зависимой переменной от его производительности и длины лавы [8]:

$$v = \frac{A_c}{\gamma m L}, \quad (2)$$

где γ — удельный вес угля, т/м³; m — вынимаемая мощность пласта, м; L — длина лавы, м.

Подставляя (2) в (1) и проведя преобразования, получим:

$$I_{\text{пл}} = \frac{K K_{\text{пл}}}{1440} \left(K_{\text{ТУ}} A_c + \frac{K(1 - K_{\text{ТУ}}) A_c}{e^{\frac{n_1 A_c}{\gamma m L}}} \right). \quad (3)$$

Как видно, эта зависимость метановыделения относительно производительности очистного забоя представляет собой сумму линейной и показательной функций вида

$$y = ax + \frac{bx}{e^{cx}}. \quad (4)$$

Второе слагаемое в (4) имеет максимум относительно аргумента [11], а вся функция (4) является нелинейной, асимптотически возрастающей. Соответственно зависимость метановыделения нелинейно возрастает с увеличением производительности очистного забоя (рис. 1).

Таким образом, существующие методики [5–8] и расчетная формула (1) не позволяют объяснить снижение метановыделения при высоких скоростях подвигания очистного забоя. Это расхождение между фактическими и расчетными показателями весьма существенно. Теоретические значения метановыделения превышают фактические в 2–5 раз [2], что говорит о необходимости совершенствования существующей методики по расчету метановыделения в очистных забоях.

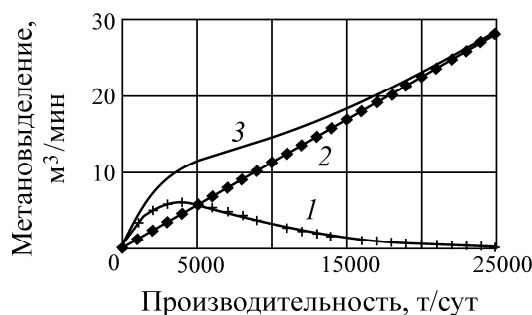


Рис. 1. Возрастающая нелинейная зависимость метановыделения от производительности очистного забоя по действующим инструкциям: 1 — показательная функция; 2 — линейная; 3 — суммарная

Для расчета абсолютного метановыделения из разрабатываемого пласта более корректной, на наш взгляд, является формула

$$I_{\text{пл}} = (X - X_0)K_{\text{пл}}A(K_{\text{ТУ}} + K(1 - K_{\text{ТУ}})e^{-n_1v}) \tag{5}$$

при условии

$$A = \min(A_k, A_c, A_m, A_L), \tag{6}$$

где X_0 — остаточная газоносность разрабатываемого пласта, м³/мин; A_k, A_c, A_m, A_L — производительность очистного забоя, определенная соответственно по скорости подачи очистного комбайна, пропускной способности скребкового конвейера, скорости передвижки механизированной крепи и допускаемой по газовому фактору длине очистного забоя [9].

Однако в этой формуле по-прежнему не учитывается фракционный состав угля. В [1] снижение метановыделения при высокой производительности очистного забоя объясняется изменением фракционного состава отбитого угля. В основе полученной в [1] экстремальной зависимости метановыделения лежит закон Дарси о фильтрации метана и гипотеза о пропорциональном изменении среднего диаметра куска отбитого угля от скорости подачи очистного комбайна.

Рассмотрим более подробно расчет дебита метана из отбитого угля в зависимости от его фракционного состава. Зависимость дебита метана от скорости движения очистного комбайна будем определять по различным фракциям отбитого угля в соответствии с законом Дарси, который преобразуем следующим образом:

$$Q(v) = \sum_{i=1}^k F_i \omega_i = \sum_{i=1}^k (f_i n_i) \omega_i = \sum_{i=1}^k \left(4\pi R_i^2 \frac{3vnr\beta_i(v)}{4\pi R_i^3} \cdot \frac{60k_1(P - P_a)}{\mu R_i} \right) = \frac{180vnrk_1(P - P_a)}{\mu} \sum_{i=1}^k \frac{\beta_i(v)}{R_i^2}, \tag{7}$$

где k — количество фракций отбитого угля; F_i — суммарная площадь поверхности частиц угля i -й фракции, м²; ω_i — средняя линейная скорость фильтрации метана через раздробленный уголь, м/мин; $f_i = 4\pi R_i^2$ — площадь поверхности сферической частицы со средним радиусом R_i в i -й фракции, м²; n_i — количество частиц отбитого угля i -й фракции, определяемое по формуле

$$n_i = \frac{vmr\beta_i(v)}{V_i} = \frac{3vmr\beta_i(v)}{4\pi R_i^3}; \tag{8}$$

v — скорость движения или рабочая скорость подачи очистного комбайна, м/мин; r — ширина захвата комбайна, м; k_1 — коэффициент проницаемости угля; P, P_a — соответственно поровое давление газа внутри куска угля и атмосферное давление в забое, Па; μ — абсолютная вязкость среды на пути фильтрации метана, Па·с; V_i — средний объем сферической частицы i -й фракции, м³; $\beta_i(v)$ — зависимость выхода класса i -й фракции от скорости движения очистного комбайна, %.

Зависимость выхода класса i -й фракции от скорости движения очистного комбайна найдем статистическим путем. На основании обработки данных [12] о фракционном составе отбитого угля в табл. 1 приведены значения выхода различных фракций в зависимости от скорости движения очистного комбайна.

ТАБЛИЦА 1. Выход фракций отбитого угля в зависимости от скорости очистного комбайна, %

Фракция	Скорость комбайна, м/мин						Средний диаметр куска угля, мм
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	
+ 100 мм	12	19	23	25	26.5	28	100
+ 50–100 мм	16	16	16	16	15.5	15	75
+ 25–50 мм	14	17	15	15	18	18	37.5
+ 13–25 мм	17	12	13	12	9	9	19
– 13 мм	41	36	33	32	31	30	13

Видно, что при увеличении скорости движения очистного комбайна с 1.0 до 6.0 м/мин выход крупной фракции (+ 100 мм) увеличивается с 12 до 28 %, а мелкой фракции (– 13 мм) уменьшается с 41 до 30 %.

Следует заметить, что основной недостаток работы современных механизированных комплексов заключается в переизмельчении угля шнековыми очистными комбайнами. Высокое содержание мелких классов угля приводит к повышению метановыделения в очистном забое и снижению его рыночной цены. Так, на шахте “Костромовская” 70 % добытого угля составляют классы “штыб” и “семечко” с фракционным составом соответственно + 0–6 и + 6–13 мм.

В результате статистической обработки данных табл. 1 получена серия линейных регрессионных зависимостей выхода фракций угля от скорости движения комбайна (рис. 2).

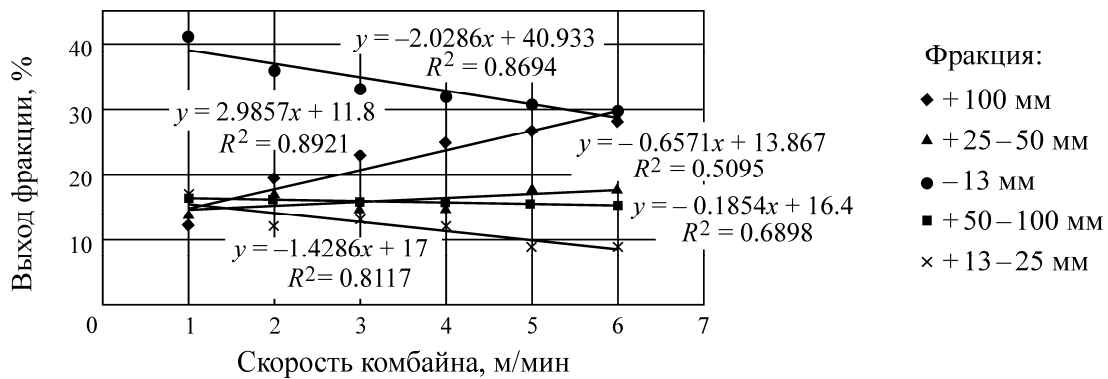


Рис. 2. Регрессионные зависимости выхода фракций отбитого угля от скорости движения очистного комбайна

С учетом этих зависимостей формула (7) преобразуется в виде параболической зависимости метановыделения от скорости движения очистного комбайна:

$$Q(v) = \frac{180vmrk_1(P-P_a)}{\mu} \left(\frac{2.99v+11.8}{0.1^2} + \frac{-0.19v+16.4}{0.075^2} + \frac{0.669v+13.86}{0.0375^2} + \frac{-1.43v+17}{0.019^2} + \frac{-2.03v+40.93}{0.013^2} \right) = \frac{1.8 \cdot 10^5 mrk_1(P-P_a)}{\mu} (-15.2v^2 + 303.2v). \tag{9}$$

На рис. 3 представлена параболическая зависимость метановыделения от скорости подачи очистного комбайна при следующих исходных данных: $m = 3.0$ м, $r = 1.0$ м, $k_1 = 10^{-13}$ м², $\mu = 1.08 \cdot 10^{-5}$ Па·с. В табл. 2 для этих данных приведены полученные расчетные значения метановыделения и производительности очистного забоя.

Как следует из табл. 2, максимальное значение дебита метана 7.56 м³/мин в данном примере соответствует скорости подачи комбайна 10 м/мин и производительности очистного забоя 16380 т/сут. При дальнейшем увеличении скорости движения очистного комбайна до 18 м/мин и производительности очистного забоя до 30 тыс. т/сут дебит метана снижается до 2.68 м³/мин.



Рис. 3. Параболическая зависимость метановыделения от скорости движения очистного комбайна

ТАБЛИЦА 2. Расчетные значения дебита метана и производительности очистного забоя

Показатель	Скорость комбайна, м/мин								
	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0
Производительность очистного забоя, т/сут	3276	6552	9828	13104	16380	19656	22932	26208	29484
Расчетный дебит метана, м³/мин	2.73	4.85	6.36	7.26	7.56	7.25	6.33	4.8	2.68

Таким образом, учет фракционного состава отбитого очистным комбайном угля существенно изменяет зависимость (1) метановыделения от производительности очистного забоя. Параболические зависимости метановыделения от скорости комбайна и производительности очистного забоя подтверждаются фактическими показателями шахт Кузбасса (табл. 3, рис. 4) и аналогичными регрессионными зависимостями, полученными в [3] для условий шахты им. Засядько.

ТАБЛИЦА 3. Регрессионные зависимости метановыделения на шахтах Кузбасса

Шахта	Параболическая зависимость метановыделения, м³/мин	Коэффициент аппроксимации	Среднеквадратическое отклонение
Тагарышская	$Q(A) = 0.47 + 0.00032A - 5.25 \cdot 10^{-8}A^2$	0.53	0.268
Котинская	$Q(A) = 1.96 + 0.00054A - 1.44 \cdot 10^{-8}A^2$	0.52	2.15
Талдинская-Западная	$Q(A) = 0.295 + 0.001A - 9.0 \cdot 10^{-8}A^2$	0.86	1.44

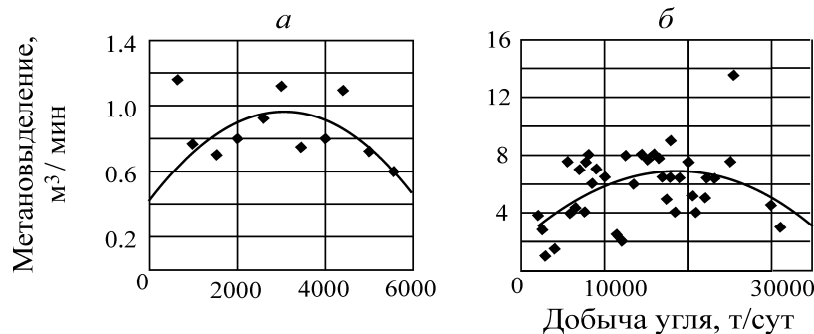


Рис. 4. Фактические данные и параболические регрессионные зависимости метановыделения в очистных забоях: а — на шахте “Тагарышская”; б — на шахте “Котинская”

Следует также отметить, что повышение скорости подачи и производительности очистных комбайнов имеет ряд важных последствий, позволяющих существенно увеличить эффективность очистных работ:

- снижается метановыделение в очистной забой и соответственно увеличивается допустимая производительность очистного забоя по газовому фактору;
- снижается опорное горное давление на механизированную крепь и очистной забой;
- повышается сортность отбитого угля, что приводит в конечном итоге к повышению рыночной цены угля и увеличению прибыли;
- увеличивается производительность труда и безопасность работ в очистных забоях.

ВЫВОДЫ

На основании закона фильтрации метана из раздробленного угля с различным фракционным составом теоретически доказано существование параболической зависимости метановыделения от скорости подачи и производительности очистного комбайна.

При низкой скорости движения очистного комбайна происходит переизмельчение угля при погружке на лавный скребковый конвейер, что приводит к увеличению дебита метана из угольной массы. При высокой скорости подачи очистного комбайна увеличивается выход крупных фракций угля и происходит снижение метановыделения в очистной забой. Снижение метановыделения при высоких скоростях подвигания очистного забоя подтверждается теоретическими результатами и фактическими данными замеров средствами аэрогазового контроля на ряде шахт Кузбасса и Донбасса.

Полученные результаты существенно расходятся с действующими в отрасли инструкциями по расчету метановыделения в очистных забоях. В связи с этим в действующие инструкции необходимо внести соответствующие изменения и корректировки по расчету метановыделения с учетом фракционного состава угля и скорости подачи очистного комбайна.

Повышение сортности угля из очистных забоев становится наиболее важной задачей при подземной разработке метаносных угольных пластов, так как решение этой задачи позволит снизить метановыделение из отбитого угля, увеличить рыночную цену угля, повысить производительность и безопасность труда в очистных забоях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Тимошенко А. М., Баранова М. Н., Никифоров Д. В. и др. Некоторые аспекты применения нормативных документов при проектировании высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт. — Кемерово: Вестн. НЦ ВостНИИ. — 2010. — № 1. — С. 12–18.
3. Бокий А. Б. Влияние уровня угледобычи на дебит парниковых газов в очистную выработку // Геотехн. механика. — 2010. — Вып. 88. — С. 247–255.
4. Гращенков Н. Ф., Петросян А. Э., Фролов М. А. и др. Рудничная вентиляция: справочник: под ред. К. З. Ушакова. — М.: Недра, 1988. — 440 с.
5. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт: Проект. — М., 2010.
6. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. — Макеевка-Донбасс, 1989.
7. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. — Киев, 1994.
8. 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.
9. Ордин А. А., Тимошенко А. М., Коленчук С. А. Обоснование допускаемой длины и производительности механизированного очистного забоя шахты по газовому фактору с учетом неравномерности движения воздушного потока // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 116–124.
10. Ордин А. А., Метельков А. А. К вопросу об оптимизации длины и производительности комплексно-механизированного очистного забоя угольной шахты // ФТПРПИ. — 2013. — № 2. — С. 100–112.
11. Бронштейн Н. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М.: Наука, 1986. — 545 с.
12. Забурдяев Г. С., Новикова И. А., Подображин А. С. Метано-и пылевыведение в процессе работы шнековых исполнительных органов // ГИАБ. — 2008. — № 53. — С. 56–64.

Поступила в редакцию 30/III 2016