

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.33.013.3

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ ОТ ПРИРОДНОЙ МЕТАНОНОСНОСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЦОВ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА

А. А. Ордин¹, А. М. Тимошенко²

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

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

Выявлено несоответствие между нормативными зависимостями и фактическими данными метановыделения в очистных забоях на ряде шахт Кузбасса. Средствами аэрогазового контроля установлено, что при высокой скорости подачи и производительности очистного комбайна фактические показатели метановыделения из отбитого угля значительно ниже нормативных. Показана связь среднего диаметра куска отбитого угля со скоростью подачи очистного комбайна и частотой вращения шнека с использованием закона фильтрации Дарси и уравнения сорбции Ленгмюра. Установлены нелинейная зависимость метановыделения из отбитого угля от природной метаноносности пласта и существование экстремума зависимости абсолютного метановыделения в очистном забое от скорости подачи и производительности очистного комбайна.

Шахта, угольный пласт, фракционный состав, сорбция, метановыделение, тангенциальный резец, скорость подачи, производительность, очистной комбайн

По существующим руководствам [1–4], количество воздуха для проветривания очистного забоя прямо пропорционально абсолютному метановыделению из разрабатываемого пласта:

$$Q = \frac{100Ik_n k_b}{c - c_0}, \quad (1)$$

где c , c_0 — соответственно допускаемая по правилам безопасности концентрация метана на исходящей струе воздуха и концентрация метана на входящей в очистной забой струе воздуха, %; k_n , k_b — коэффициенты соответственно неравномерности газовыделения и выноса метана в выработанное пространство утечками воздуха из очистного забоя; I — абсолютное метановыделение из разрабатываемого пласта, определяемое по формуле [4]:

$$I = \frac{KK_{пл}A_c}{1440} (K_{ты} + K(1 - K_{ты})e^{-n_v}), \quad (2)$$

где $X = X_c + X_{св}$ — природная метаноносность разрабатываемого пласта, $\text{м}^3/\text{т}$, X_c , $X_{св}$ — соответственно объем сорбированного и свободного метана в угле, $\text{м}^3/\text{т}$; $K_{пл}$ — коэффициент дренирования пласта, учитывающий влияние системы разработки; A_c — максимальная производительность очистного комбайна, $\text{т}/\text{сут}$; $K_{ту}$ — коэффициент, учитывающий степень дегазации отбитого угля при его транспортировании по выработкам участка; K — коэффициент, характеризующий газоносность кромки свежесобранного пласта; n_1 — коэффициент газоотдачи пласта через обнаженную поверхность очистного забоя; v — скорость подвигания очистного забоя, $\text{м}/\text{сут}$.

Проведенные расчеты абсолютного метановыделения (2) в очистных забоях ряда шахт Кузбасса — “Котинская”, “Тагарышская”, “Талдинская-Западная” — показывают значительное несовпадение расчетных данных с фактическими показателями, полученными средствами аэрогазового контроля [5]. Это связано со следующими недостатками формулы (2):

— суточная производительность очистного забоя переводится в минутную делением на количество минут в сутках, однако в ремонтную смену метановыделение из очистного забоя значительно снижается, так как добыча угля не ведется [6];

— используется максимальная производительность очистного комбайна, но на многих шахтах производительность очистного забоя сдерживается по ряду причин: например, газовым фактором, низкой пропускной способностью конвейерного транспорта, недостаточной скоростью передвижки секций механизированной крепи;

— не учитываются такие факторы, как фракционный состав отбитого комбайном угля, скорость фильтрации и десорбции метана из раздробленной угольной массы, кинематика движения очистного комбайна и др.;

— используются линейные зависимости метановыделения от природной метаноносности и производительности очистного забоя, что, как показали наши исследования, не соответствует действительности.

В основе расчета абсолютного метановыделения из разрабатываемого пласта лежит простая логика — удельный объем метана, содержащийся в 1 т угля, умножается на минутную максимальную производительность очистного комбайна. Добавление в (2) к линейной зависимости метановыделения от производительности очистного забоя экспоненты, связанной со скоростью подвигания очистного забоя, не меняет сути дела, так как приводит к еще большему отклонению расчетных показателей от фактических [5].

По этим причинам результаты расчета метановыделения по формуле (2) в реальных условиях добычи угля на шахтах Кузбасса существенно расходятся с фактическими замерами дебита метана средствами аэрогазового контроля [5]. Так, на рис. 1 показано, что при достигнутой производительности 30 тыс. $\text{т}/\text{сут}$ в лаве № 5203 шахты “Котинская” фактическое метановыделение составило 5 $\text{м}^3/\text{мин}$, а теоретическое — 28 $\text{м}^3/\text{мин}$, т. е. расхождение между фактическими и теоретическими данными метановыделения составляет более чем 5 раз! Аналогичные результаты несовпадения фактических и теоретических данных метановыделения получены для всех шести лав № 5202 ÷ 5207 шахты “Котинская”, а также для шахт “Тагарышская” и “Талдинская-Западная” [5].

Учет перечисленных факторов приводит к нелинейной, более резко возрастающей зависимости абсолютного метановыделения от природной метаноносности угля и к экстремальной зависимости от производительности очистного комбайна.



Рис. 1. Расчетные (1) и фактические (2) значения метановыделения в лаве № 5203 шахты “Котинская”

Абсолютное метановыделение в очистном забое, которое поступает из отбитого комбайном угля, с учетом его фракционного состава определяется в соответствии с известным законом фильтрации Дарси по формуле, полученной в [6]:

$$Q = \frac{180v_n m r k_1 (P - P_a)}{\mu} \sum_{i=1}^k \frac{\beta_i(v)}{R_i^2}, \tag{3}$$

где v_n — скорость подачи очистного комбайна, м/мин; m — вынимаемая мощность угольного пласта, м; r — ширина захвата комбайна, м; k — количество классов фракций отбитого угля; k_1 — коэффициент проницаемости угля, м²; 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; $\beta_i(v)$ — зависимость выхода класса i -й фракции от скорости движения очистного комбайна, %; R_i — средний радиус частицы угля i -й фракции, м.

Метан в горных породах находится в двух состояниях: свободном и связанном (сорбированном). Количество сорбированного в угле метана при постоянной температуре зависит от давления P газа и определяется из уравнения сорбции Ленгмюра [7]:

$$X_c = \frac{abP}{1 + bP}, \tag{4}$$

где a, b — постоянные изотермы Ленгмюра, для угля определяемые по [8]: $a = 49.3$ м³/т, $b = 0.207 \cdot 10^{-6}$ 1/Па.

Выразим из (4) поровое давление в виде зависимости от объема сорбированного в угле метана:

$$P = \frac{X_c}{ab - bX_c} = \frac{1}{b(aX_c^{-1} - 1)} \tag{5}$$

и, подставив (5) в (3), получим формулу для определения газовой выделение из отбитого угля в очистном забое с учетом десорбции метана:

$$Q = \frac{180v_n m r k_1 (X_c(1 + bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - X_c)} \sum_{i=1}^k \frac{\beta_i(v_n)}{R_i^2}. \tag{6}$$

Анализ зависимости (5) показывает, что поровое давление в куске угля нелинейно зависит от объема сорбированного в угле метана (рис. 1). Следовательно, аналогичную нелинейную зависимость от объема сорбированного метана имеет и абсолютное метановыделение (6) (рис. 2).

Так как основной объем (90–95 %) метана, содержащегося в угольных пластах, находится в сорбированном состоянии [9], то в (6) количество сорбированного в угле метана можно заменить на природную метаноносность.

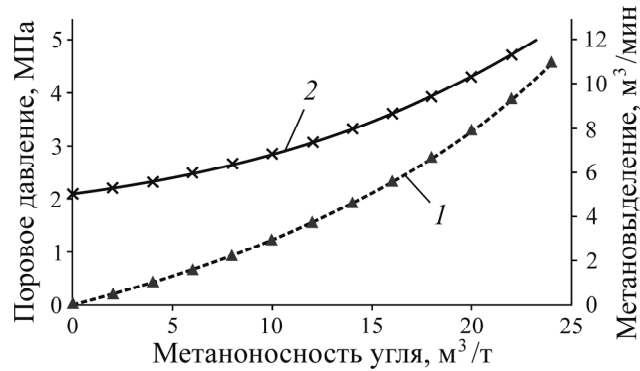


Рис. 2. Нелинейные зависимости порового давления (1) и метановыделения (2) от природной метаноносности угольного пласта

Тогда, в отличие от линейной зависимости (2), получаем нелинейную, более резко возрастающую зависимость абсолютного метановыделения от природной метаноносности X угольного пласта:

$$Q(X) = \frac{180v_n m r k_1 (0.9X(1 + bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0.9X)} \sum_{i=1}^k \frac{\beta_i(v_n)}{R_i^2}. \quad (7)$$

Проведенный анализ фактической абсолютной газообильности лав № 5202 ÷ 5207 в зависимости от природной метаноносности на различных участках пласта № 52 шахты “Котинская” свидетельствует об аналогичной закономерности (таблица, рис. 3).

Однако воспользоваться формулой (7) на стадии проектирования шахт затруднительно, поскольку сведения о фракционном составе отбитого угля на проектируемой шахте отсутствуют. Поэтому обосновать корректную зависимость абсолютного метановыделения можно с помощью анализа кинематики движения резцов при отбойке угля шнековым комбайном.

Изменение абсолютной метанообильности очистных забоев в зависимости от природной газоносности разрабатываемого пласта № 52 шахты “Котинская”

Номер лавы	Природная газоносность X , м³/т	Добыча угля, при которой достигается максимум метановыделения, т/сут	Достигнутый максимум газообильности очистного забоя, м³/мин
5202	4.0	3800	1.91
5206	6.6	8400	2.62
5205	8.2	13000	3.57
5204	0	16600	10.40
5203	11.0	20000	11.03
5207	12.5	24400	15.67

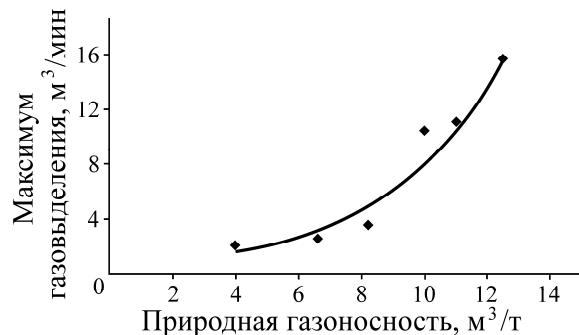


Рис. 3. Фактическая зависимость абсолютного газовыделения в очистной забой от природной газоносности разрабатываемого пласта № 52 шахты “Котинская”

Тангенциальный резец при отбойке угля совершает сложное движение, состоящее из поступательного движения комбайна и вращательного движения шнека. В результате такого движения в пласте угля формируется серповидный срез [10–13]. Абсолютная скорость резца является векторной суммой переносной скорости подачи комбайна v_n и относительной или окружной скорости при вращении шнека v_o и, согласно рис. 4, представляет переменную величину, изменяющуюся от максимального значения в верхней части отбиваемого слоя пласта до минимального в нижней части. Это приводит к неравномерности толщины среза и цикличности создаваемой силы для резания пласта.

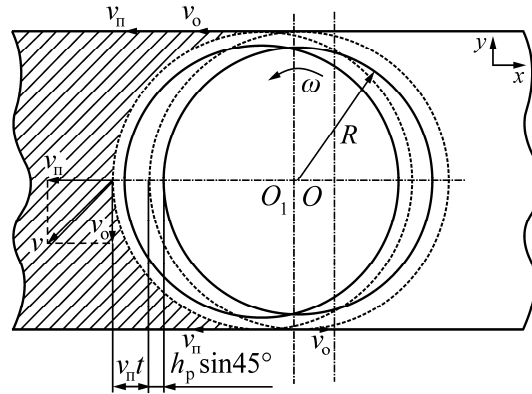


Рис. 4. Форма серповидного среза пласта резцом шнекового комбайна и векторная сумма скоростей подачи и резания

Скорость подачи очистного комбайна связана с максимальной глубиной среза, частотой вращения шнека и числом резцов в одной линии резания зависимостью $v_n = h_m n n_{1л}$, где h_m — максимальная толщина среза при повороте шнека на 90° , м; n — частота вращения шнека, мин^{-1} ; $n_{1л}$ — количество резцов в одной линии резания.

Средняя толщина этого среза рассчитывается по формуле [10]:

$$h_{cp} = \frac{2h_m}{\pi} = \frac{2v_n}{\pi n n_{1л}} \tag{8}$$

Вычислим диаметр куска отбитого угля как среднее арифметическое между средней толщиной среза и расстоянием h_p между резцами на лопастях шнека:

$$d_{cp} = 0.5(h_{cp} + h_p) = \frac{v_n}{\pi n n_{1л}} + 0.5h_p \tag{9}$$

Как видно из (9), средний диаметр отбитого куска угля прямо пропорционален скорости подачи очистного комбайна и обратно пропорционален частоте вращения шнека (рис. 5).

Абсолютное метановыделение из отбитого угля со средним диаметром куска d_{cp} определим с учетом (7), (9) и формулы, приведенной в [14]:

$$\begin{aligned} Q_o(X, v_n) &= \frac{720v_n mrk_1(0.9X(1 + bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0.9X)d_{cp}^2} = \frac{720v_n mrk_1(0.9X(1 + bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0.9X) \left(\frac{v_n}{\pi n n_{1л}} + 0.5h_p \right)^2} = \\ &= \frac{720mrk_1(0.9X(1 + bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0.9X) \left(\frac{v_n}{(\pi n n_{1л})^2} + \frac{h_p}{\pi n n_{1л}} + \frac{0.25h_p^2}{v_n} \right)} \end{aligned} \tag{10}$$

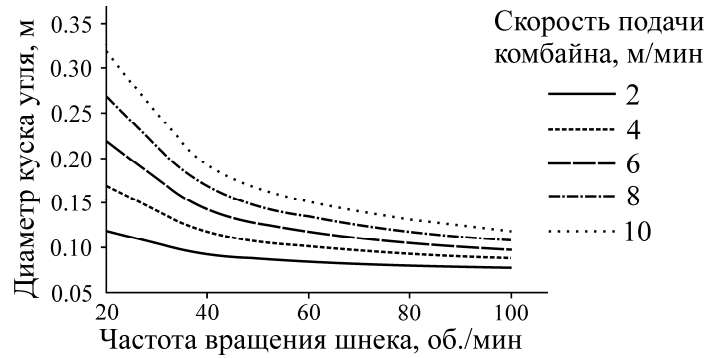


Рис. 5. Зависимость среднего диаметра куска угля от частоты вращения шнека и скорости подачи очистного комбайна

Анализ полученной зависимости (10) показывает, что знаменатель формулы имеет минимум относительно скорости подачи комбайна. Следовательно, функция метановыделения имеет максимум относительно этой скорости. Метановыделение из отбитого угля в квадратичной зависимости снижается при уменьшении частоты вращения шнека.

Поскольку скорость подачи очистного комбайна связана с его теоретической производительностью соотношением $A = \gamma m r v_{\text{п}}$ [9–13], то функция метановыделения из обнаженной поверхности пласта и отбитого угля также имеет максимум относительно производительности A очистного забоя:

$$Q(X, A) = mLv_1 + \frac{720mrk_1(0.9X(1 + bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0.9X) \left(\frac{A}{\gamma m r (\pi n n_{1\text{п}})^2} + \frac{h_p}{\pi n n_{1\text{п}}} + \frac{0.25\gamma m r h_p^2}{A} \right)}. \quad (11)$$

На рис. 6 приведены теоретическая кривая (11) и данные фактических замеров метановыделения в лаве № 5203 шахты “Котинская” в зависимости от производительности очистного забоя. Видно, что полученная теоретическая зависимость достаточно хорошо описывает фактическое метановыделение и существенно отличается от результатов расчета по формуле (2) (см. рис. 1).

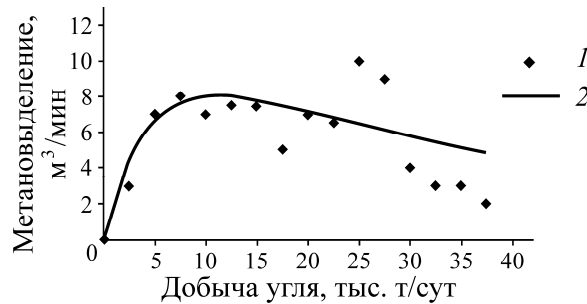


Рис. 6. Зависимость метановыделения из лавы № 5203 шахты “Котинская” от производительности очистного забоя: 1 — фактическое; 2 — теоретическое

Таким образом, в результате использования закона фильтрации Дарси и уравнения сорбции Ленгмюра теоретически доказано, что метановыделение из отбитого угля нелинейно возрастает с увеличением природной метаноносности угля и имеет максимум относительно скорости подачи и производительности очистного комбайна. При дальнейшем увеличении скорости подачи и производительности очистного забоя происходит снижение метановыделения вследствие изменения фракционного состава отбитого угля в сторону увеличения его крупности. Снижение метановыделения при высоких скоростях подвигания и производительности очистного забоя зафиксировано средствами аэрогазового контроля на ряде шахт Кузбасса и Донбасса [5, 15].

ВЫВОДЫ

Результаты расчета абсолютного метановыделения в очистных забоях ряда шахт Кузбасса по действующим инструкциям показывают, что расчетные данные не совпадают с фактическими измерениями дебита метана средствами аэрогазового контроля. Некорректность существующей в действующих инструкциях формулы для расчета абсолютного метановыделения из очистного забоя вызвана применением простейших линейных его зависимостей от природной метаносности пласта и производительности очистного забоя, а также отсутствием учета фракционного состава отбитого угля, законов фильтрации и десорбции метана.

При низкой скорости движения очистного комбайна происходит переизмельчение угля при его отбойке и погрузке, что приводит к увеличению дебита метана из угольной массы. При высокой скорости увеличивается глубина среза и выход крупных фракций угля, вследствие чего происходит снижение метановыделения в очистной забой.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Руководство** по проектированию вентиляции угольных шахт. — Киев, 1994. — 311 с.
2. **Руководство** по проектированию вентиляции угольных шахт. Проект. — М., 2010.
3. **Гращенко Н. Ф., Петросян А. Э., Фролов М. А. и др.** Рудничная вентиляция: справочник / под ред. К. З. Ушакова. — М.: Недра, 1988. — 439 с.
4. **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. — М., 2011. — 118 с.
5. **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.
6. **Ордин А. А., Тимошенко А. М.** О влиянии фракционного состава угля на метановыделение в очистном забое // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 104–110.
7. **Венгеров И. Р.** Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы. — Донецк: Норд-Пресс, 2008. — 631 с.
8. **Семькин Ю. А.** Повышение безопасности добычи угля на основе интенсификации газовыделения из пластовых скважин и совершенствования метода прогноза газообильности очистного забоя: дис. ... канд. техн. наук. — М.: НИТУ МИСиС, 2016. — 148 с.
9. **Сторонский Н. М., Хрюкин В. Т., Митронов Д. В., Швачко Е. В.** Нетрадиционные ресурсы метана угленосных толщ // Рос. хим. журн. — 2008. — № 6. — С. 63–72.
10. **Плотников В. П.** Вывод формулы для расчета производительности очистных комбайнов со шнековым, барабанным или корончатым исполнительным органом // Уголь. — 2009. — № 9. — С. 5–7.
11. **Плотников В. П.** Направления совершенствования выемочных комбайнов для добычи крупного угля // ГИАБ. — 2006. — № 1. — С. 100–105.
12. **Солод В. И., Гетопанов В. Н., Рачек В. М.** Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. — М.: Недра, 1982. — 350 с.
13. **Малеев Г. В., Гуляев В. Г., Бойко Н. Г. и др.** Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. — М.: Недра, 1988. — 368 с.
14. **Ордин А. А., Тимошенко А. М.** О снижении метановыделения из разрабатываемого угольного пласта при высоких скоростях подвигания очистного забоя // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 123–130.
15. **Бокий А. Б.** Влияние уровня угледобычи на дебит парниковых газов в очистную выработку // Геотехническая механика: сб. науч. тр. — 2010. — Вып. 88. — С. 247–255.

Поступила в редакцию 10/II 2017