

УДК 539.3

**О СНИЖЕНИИ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ  
ИЗ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА  
ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ПОДВИГАНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

**А. А. Ордин<sup>1</sup>, А. М. Тимошенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: [ordin@misd.nsc.ru](mailto:ordin@misd.nsc.ru),  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

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

Теоретически доказано существование нелинейной экстремальной зависимости абсолютного метановыделения из разрабатываемого угольного пласта от производительности очистного забоя. Приводятся фактические и теоретические доказательства снижения абсолютного метановыделения из разрабатываемого угольного пласта при высоких скоростях подвигания очистного забоя.

*Шахта, угольный пласт, абсолютное и относительное метановыделение, скорость подвигания очистного забоя, концентрация метана*

В России угольные месторождения являются самыми метаноносными в мире. Если среднемировые показатели содержания метана в угольных пластах составляют 4.9 кг/т, то в России 8.9 кг/т [1]. По этой причине эффективность проветривания высокопроизводительных очистных забоев в России часто является неудовлетворительной, о чем свидетельствует большое количество загазований в очистных и подготовительных выработках: 840–890 случаев в год [2].

Вместе с тем фактические показатели абсолютного метановыделения из разрабатываемых угольных пластов на шахтах “Котинская”, “Талдинская-Западная-1”, “Тагарышская” в Кузбассе [3] и им. А. Ф. Засядько в Донбассе [4] свидетельствуют о снижении объемов выделяемого метана из отбитого комбайном угля при высоких скоростях подвигания механизированных очистных забоев (рис. 1). Так, на шахте “Котинская” при увеличении добычи угля в очистном забое с 15 000 до 30 000 т/сут абсолютное метановыделение из разрабатываемого пласта снизилось с 8.0 до 4.5 м<sup>3</sup>/мин [3]. По фактическим данным работы очистных забоев на шахте им. А. Ф. Засядько установлено, что при увеличении добычи угля в забое с 2500 до 4000 т/сут дебит метана снижался с 15 до 7 м<sup>3</sup>/мин [4]. По этим статистическим данным в работе [4] с высокими коэффициентами регрессии приведены параболические зависимости метановыделения от производительности очистных забоев, имеющие точки максимума.

Физическое объяснение этого положительного явления приведено в работах [5, 6] и заключается в том, что при высоких скоростях подвигания очистных забоев метан удаляется из очистного забоя быстрее, чем накапливается. “В процессе работы выемочной машины время пребывания отбитого угля в пределах очистного забоя различной длины и скорости движения цепи забойного конвейера составляет 1–5 мин, что по времени дает возможность удалить из лавы уголь

со значительными запасами метана в нем. При этом одновременно с ростом нагрузки на лаву (скорости подвигания забоя) снижается доля газовыделения с обнаженной в лаве поверхности пласта” [5].

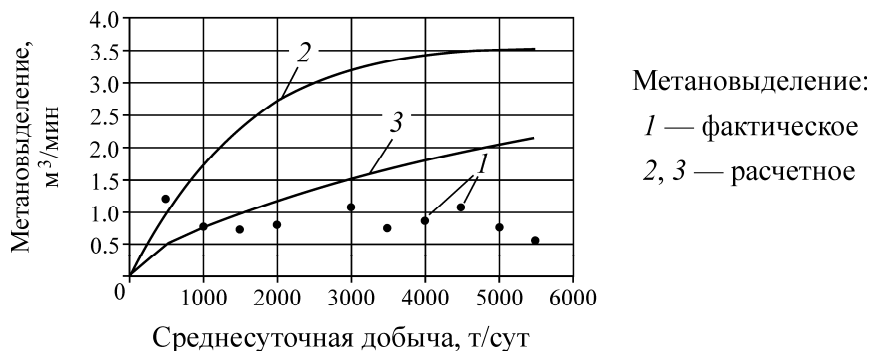


Рис. 1. Метановыделение в очистном забое шахты “Тагарышская”

По существующим методикам [5, 7–9] расчета вентиляции очистных забоев абсолютное метановыделение  $I_{\text{пл}}$  из разрабатываемого пласта пропорционально производительности  $A$  очистного комбайна и нелинейно зависит от скорости подвигания очистного забоя, м<sup>3</sup>/мин:

$$I_{\text{пл}} = \frac{XK_{\text{пл}}A}{1400} [K_{\text{ту}} + K(1 - K_{\text{ту}})e^{-n_1v_{\text{оч}}}], \quad (1)$$

где  $X$  — природная газоносность разрабатываемого пласта, м<sup>3</sup>/т;  $K_{\text{пл}}$  — коэффициент дренирования пласта, учитывающий влияние системы разработки;  $A$  — 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 свежееобнаженного забоя;  $n_1$  — коэффициент, характеризующий газоотдачу пласта через обнаженную поверхность очистного забоя;  $v_{\text{оч}}$  — скорость подвигания очистного забоя, м/сут.

Однако полученные по зависимости (2) значения метановыделения не совпадают с фактически замеренными объемами метана на указанных шахтах (рис. 1) [3, 6]. Это расхождение существенно — на этих шахтах теоретические значения метановыделения превышают фактические в 2–5 раз [3], что говорит о необходимости совершенствования существующих методик по проветриванию очистных забоев.

Источниками поступления метана в очистном забое являются обнаженная поверхность разрабатываемого пласта, отбиваемый и размельчаемый шнеками комбайна уголь, отбитый уголь, транспортируемый скребковым лавным конвейером и остающийся на почве пласта при односторонней схеме работы комбайна. Кроме того, метан может поступать в очистной забой из выработанного пространства, вмещающих пород кровли и почвы разрабатываемого пласта, а также из сближенных угольных пластов-спутников.

Многочисленные наблюдения и фактические замеры в шахте показывают, что основным источником поступления метана в очистной забой является разрушаемый шнековым комбайном уголь [10–12]. При этом интенсивность поступления метана в забой в значительной мере зависит от фракционного состава разрушенного угля. Общая закономерность здесь проявляется в том, что с увеличением степени измельчения шнеком угля дебит метана возрастает [10, 12]. В этой связи значительным достоинством обладает струговая выемка угля, при которой пласт разрушается крупными фракциями и метановыделение в забой значительно снижается [13].

Эмпирическая зависимость этой закономерности приведена в [10] в виде экспоненты:

$$g = g_0 \exp(-kt), \quad (2)$$

где  $g$ ,  $g_0$  — газовыделение из отбитого угля соответственно в текущий момент времени и с начала отбойки в единицу времени на единицу массы;  $k$  — коэффициент, зависящий от свойств и размеров фракций раздробленного угля;  $t$  — время, прошедшее с момента отбойки угля.

Однако воспользоваться этой зависимостью для решения задач проветривания очистных забоев на стадии проектирования практически нереально, так как на этой стадии невозможно провести необходимые замеры газовыделения из отбитого угля для определения входящих в формулу (3) параметров.

Теоретически убывающую зависимость дебита метана от крупности отбитого угля можно установить следующим образом. Согласно гипотезе П. Реттингера [14], затраты на энергию дробления пропорциональны вновь образованной поверхности дробленого материала. Суммарная площадь поверхности дисперсного материала также входит в обобщенный закон дробления П. А. Реббиндера [14] и закон А. Дарси фильтрации газа в пористой среде [15]:

$$Q = Fv_m = \frac{60Fk(P - P_a)}{\mu R}, \quad (3)$$

где  $Q$  — объем выделяемого метана из отбитого комбайном угля, м<sup>3</sup>/мин;  $F$  — суммарная площадь поверхности кусков отбитого угля, м<sup>2</sup>;  $v_m$  — линейная скорость фильтрации метана, м/мин;  $k$  — коэффициент проницаемости угля;  $P$ ,  $P_a$  — соответственно поровое давление газа внутри куска угля и атмосферное давление в забое, Па;  $\mu$  — абсолютная вязкость среды на пути фильтрации метана, Па·с;  $R = 0.5l$  — длина фильтрующей части, равная половине среднего размера  $l$  куска угля после его отбойки комбайном, м.

Преобразуем формулу (3) для определения зависимости объемного расхода выделяемого метана из отбитого угля от его фракционного состава:

$$Q = \frac{120nfk(P - P_a)}{\mu l}, \quad (4)$$

где  $F = nf$  — суммарная площадь поверхности кусков отбитого угля, м<sup>2</sup>;  $f = 6l^2$  — общая площадь фильтрации метана через шесть граней одного куска угля кубической формы с длиной ребра  $l$ , м<sup>2</sup>;  $n$  — среднее количество частиц разрушенного угля в единицу времени, определяемое по формуле

$$n = \frac{V}{V_0} = \frac{vmr}{l^3}, \quad (5)$$

где  $V = vmr$  — объем разрушаемого комбайном угля в единицу времени, м<sup>3</sup>/мин;  $v$  — скорость движения или рабочая скорость подачи очистного комбайна вдоль лавы, м/мин;  $m$  — средняя вынимаемая мощность угольного пласта, м;  $r$  — ширина захвата комбайна, м;  $V_0 = l^3$  — средний объем отбитого куска угля кубической формы, м<sup>3</sup>.

Подставляя (5) в (4) и произведя преобразования, получаем гиперболическую зависимость абсолютного метановыделения от средних размеров куска или фракционного состава отбитого угля:

$$Q = \frac{120vmr6l^2k(P - P_a)}{l^3\mu l} = \frac{720vmrk(P - P_a)}{\mu l^2}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что дебит метана обратно пропорционален квадрату среднего линейного размера отбитого куска угля и значительно уменьшается с увеличением крупности разрушаемого угля. Это подтверждается шахтными наблюдениями: например, известно, что при струговой выемке крупность разрушаемого угля выше, чем при работе шнекового комбайна, и соответственно в меньшей степени происходит пылеобразование и метановыделение из крупных кусков угля [13].

Рабочая скорость  $v$  подачи очистного комбайна, входящая в (6), в свою очередь зависит от горно-геологических данных разрабатываемого пласта и технических параметров очистного комбайна [16]:

$$v = \frac{30N\eta n_{1л}K_{п}}{fP \cos \alpha \pm P \sin \alpha + S_{ср} D n_3 K_{от} K_{\alpha} K_b K_{з.р} K_{ф.р}}, \text{ м/мин,} \quad (7)$$

где  $N$  — мощность электродвигателя рабочего органа, кВт;  $\eta$  — КПД редуктора исполнительного органа комбайна;  $n_{1л}$  — количество резцов в одной линии резания (принимается в зависимости от конструкции шнека);  $K_{п}$  — коэффициент, учитывающий затраты мощности на перемещение комбайна;  $P$  — вес комбайна, кН;  $f$  — коэффициент трения скольжения по стали;  $\alpha$  — угол падения пласта, град;  $D$  — 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, учитывающие угол резания, ширину резца, затупление и форму резцов, соответственно  $S_{ср}$  — средневзвешенная сопротивляемость пласта угля резанию, кН/м, определяемая по формуле [15]:

$$S_{ср} = \frac{S_y m_y + S_{п} m_{п}}{m_y + m_{п}}, \quad (8)$$

где  $S_y$ ,  $S_{п}$  — сопротивляемость резанию соответственно угольных пачек пласта и породных прослоек, кН/м;  $m_y$ ,  $m_{п}$  — суммарные мощности соответственно чистых угольных пачек пласта и породных прослоек, м.

Так как крупность разрушаемого угля зависит от расстояния  $b$  между резцами на шнеке комбайна, то в первом приближении можно принять средний линейный размер разрушенного куска угля равным расстоянию  $b$  между резцами комбайна на шнеке:

$$l \approx b = \frac{r}{n_p - 1} \approx \frac{r}{n_p}, \quad (9)$$

где  $n_p$  — количество резцов комбайна на одной лопасти двух- или трехзаходного шнека.

Подставляя (9) в (6), получаем:

$$Q = \frac{720vm n_p^2 k (P - P_a)}{\mu r}. \quad (10)$$

Из формулы (10) видно, что абсолютное метановыделение из отбитого угля резко (в квадратичной зависимости) уменьшается при снижении количества резцов на лопасти шнека, приводящего к увеличению крупности разрушаемого угля.

Известно также, что при увеличении скорости подачи очистного комбайна растет выход крупных фракций угля и уменьшается метановыделение из отбитого угля [5, 10]. Так, при изменении скорости подачи комбайна с 1.0 до 6.0 м/мин выход крупной фракции угля + 100 мм уве-

личивается с 12 до 25 % [5]. Приблизленно корреляционная зависимость выхода крупной фракции от скорости движения очистного комбайна, по данным [5], с коэффициентом аппроксимации  $R^2 = 0.87$  описывается линейным уравнением

$$\beta_{+100} = 12.26 + 2.9v \%. \quad (11)$$

Средний линейный размер отбитого комбайном куска угля в зависимости от его фракционного состава определяется по формуле из законов дробления [14]:

$$l_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k \beta_i l_i}{\sum_{i=1}^k \beta_i} = 0.01 \sum_{i=1}^k \beta_i l_i \quad \text{при} \quad \sum_{i=1}^k \beta_i = 100, \quad (12)$$

где  $l_i$  — средний гранулометрический размер куска угля  $i$ -й фракции, мм;  $\beta_i$  — выход  $i$ -й фракции, %;  $k$  — количество анализируемых фракций.

Рассматривая фракционный состав отбитого угля по двум классам крупности ( $\pm 100$  мм) и учитывая зависимости (11, 12), получаем линейную зависимость среднего линейного размера куска угля от рабочей скорости движения очистного комбайна:

$$l_{cp} = 0.01[\beta_{+100} l_{+100} + (1 - \beta_{+100})l_{-100}] = 0.01[(l_{-100} + (12.26 + 2.9v)(l_{+100} - l_{-100}))] = a + bv \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (6) и произведя преобразования, находим функциональную зависимость дебита метана от скорости движения или рабочей скорости подачи очистного комбайна:

$$Q(v) = \frac{720vmrk(P - P_a)}{\mu(a + bv)^2} = \frac{720mrk(P - P_a)}{\mu\left(\frac{a^2}{v} + 2ab + b^2v\right)}. \quad (14)$$

Как видно, знаменатель в (14) имеет точку минимума и соответственно дебит метана из отбитого угля имеет точку максимума относительно скорости движения комбайна (рис. 2).



Рис. 2. Теоретическая зависимость дебита метана от скорости движения очистного комбайна по лаве

Аналогичную экстремальную зависимость имеет дебит метана относительно производительности очистного забоя, которая прямо пропорциональна рабочей скорости подачи комбайна [16]:

$$A = 60\gamma mrvT_{cm}n_{cm}. \quad (15)$$

Тогда зависимость дебита метана от производительности очистного комбайна запишется в виде

$$Q(A) = \frac{720mrk(P - P_a)}{\mu \left( \frac{60\gamma mr T_{cm} n_{cm} a^2}{A} + 2ab + \frac{b^2 A}{60\gamma mr T_{cm} n_{cm}} \right)}, \quad (16)$$

где  $\gamma$  — плотность угля, т/м<sup>3</sup>;  $T_{cm}$ ,  $n_{cm}$  — соответственно длительность рабочей смены (ч) и количество рабочих смен в сутки.

На рис. 3 показаны фактические данные и теоретические зависимости метановыделения (15) в очистных забоях шахт “Котинская” и “Тагарышская”. Видно, что теоретические кривые значительно лучше описывают фактические данные о газовыделении в очистных забоях по сравнению с зависимостями, полученным по известным методикам и руководствам [5, 7–9].

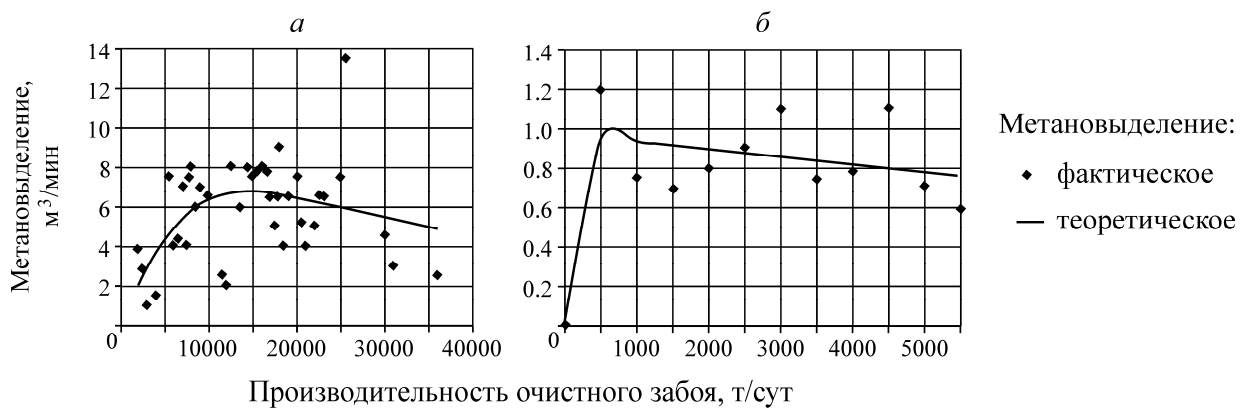


Рис. 3. Кривая метановыделения в очистном забое шахты: *a* — “Котинская”; *б* — “Тагарышская”

### ВЫВОДЫ

Установлено, что при линейной фильтрации дебит метана из отбитого очистным комбайном угля обратно пропорционален квадрату среднего линейного размера куска, т. е. значительно уменьшается с увеличением крупности разрушаемого угля. Доказано, что выход крупных фракций и средний диаметр куска отбитого очистным комбайном угля повышается в линейной зависимости от рабочей скорости его движения в лаве.

Теоретически доказано существование критических значений производительности очистного забоя и скорости его подвигания, при которых абсолютное метановыделение из разрабатываемого пласта достигает максимума. При дальнейшем повышении производительности очистного забоя дебит метана снижается вследствие увеличения крупности отбитого комбайном угля и скорости удаления отбитого угля из забоя. Это явление — снижение метановыделения при высоких скоростях подвигания очистного забоя — подтверждается фактическими данными замеров газовыделения на ряде шахт Кузбасса и Донбасса. Отсюда следует вывод о возможности повышения эффективности работы очистных забоев вследствие снижения метановыделения из отбитого угля при высоких и сверхвысоких скоростях подвигания забоя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

♦ 1. Трубецкой К. Н., Рубан А. Д., Забурдяев В. С. Методология обоснования способов и параметров дегазации угольных шахт // ФТПРПИ. — 2011. — № 1.

2. Трубецкой К. Н., Рубан А. Д., Забурдяев В. С. Особенности метановыделения в высокопроизводительных угольных шахтах // ФТПРПИ. — 2011. — № 4.
3. 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.
4. Бокий А. Б. Влияние уровня угледобычи на дебит парниковых газов в очистную выработку // Геотехническая механика: сб. науч. трудов. — Днепропетровск, 2010. — Вып. 88.
5. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Проект. — М., 2010.
6. 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.
7. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. — Макеевка-Донбасс, 1989.
8. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. — Киев, 1994.
9. 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.
10. Гращенков Н. Ф., Петросян А. Э., Фролов М. А. и др. Рудничная вентиляция: справочник: под ред. К. З. Ушакова. — М.: Недра, 1988.
11. Полевщиков Г. Я., Шинкевич М. В., Плаксин М. С. Газокинетические особенности распада углеметана на конвейерном штреке выемочного участка // ГИАБ. — 2011. — № 8.
12. Забурляев Г. С., Новикова И. А., Подображин А. С. Метано- и пылевыведение в процессе работы шнековых исполнительных органов // ГИАБ. — 2008. — № 53.
13. Мышковский М., Пашедаг У. Струговая установка или очистной комбайн // Глюкауф. — 2009. — № 3.
14. Борщев В. Я. Оборудование для измельчения материалов. — Тамбов: ТГТУ, 2004.
15. Леонтьев А. В. Основы теории фильтрации. — М.: МГУ, 2009.
16. Ордин А. А., Метельков А. А. К вопросу об оптимизации длины и производительности комплексно-механизированного очистного забоя угольной шахты // ФТПРПИ. — 2013. — № 2.

*Поступила в редакцию 14/IV 2015*