

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-82-91

**О необходимости изменения методического подхода
к расчету дебита метана в высокопроизводительных
очистных забоях Кузбасса****Ордин А. А.¹⁻³, Тимошенко А. М.⁴, Ботвенко Д. В.⁴**

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия, ✉ordin@misd.ru;

²Институт вычислительных технологий, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия;

³ООО «Научно - проектный центр ВостНИИ», г. Кемерово, Россия;

⁴Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной экологической безопасности в горной отрасли», г. Кемерово, Россия

Аннотация: Традиционно считается, что использование высокопроизводительного добычного оборудования на угольных шахтах приводит не только к увеличению производительности предприятия, но и к значительному повышению выделения метана в рудничную атмосферу. Исходя из этого, существующее нормативно-методическое обеспечение для расчета позволяло прогнозировать дебит метана в рудничную атмосферу и определять необходимые режимы работы системы проветривания для обеспечения безопасности горных работ. В работе поставлена задача исследовать на практике закономерности метановыделения от производительности добычной техники и выявить явления, влияющие на характер этих закономерностей. На основании данных средств аэрогазового контроля приведены результаты статистического исследования метановыделения в 101 очистном забое 33 шахт Кузбасса. С высокой степенью достоверности в 76 очистных забоях установлены параболические зависимости метановыделения от производительности добычной техники, имеющие точки максимума относительно скорости подачи и производительности очистного комбайна. С использованием закона А. Дарси и уравнения сорбции И. Ленгмюра теоретически установлено, что метановыделение из отбитого угля является функцией, обратно пропорциональной линейно-гиперболической зависимости, а также имеет точку максимума относительно скорости подачи и производительности очистного комбайна. Анализ установленной зависимости дебита метана из отбитого угля показывает, что метановыделение значительно, в квадратической зависимости, снижается при уменьшении частоты вращения шнека и количества резцов в линии резания или количества лопастей на шнеке. Метановыделение также в квадратической зависимости растет с увеличением мощности пласта и ширины забоя комбайна. Экстремальная зависимость дебита метана из отбитого угля формирует две области допустимых значений скорости подачи и производительности очистного комбайна по газовому фактору.

Ключевые слова: шнек, угольный пласт, метановыделение, концентрация метана, статистический анализ, допустимая производительность очистного забоя, газовый фактор, скорость подачи комбайна, выход фракций.

Для цитирования: Ордин А. А., Тимошенко А. М., Ботвенко Д. В. О необходимости изменения методического подхода к расчету дебита метана в высокопроизводительных очистных забоях Кузбасса. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):82-91. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-82-91.

About the Necessity for Changing the Methodical Approach to the Calculation of Methane Release Rate in High-Performance Working Faces of Kuzbass

A. A. Ordin¹⁻³, A. M. Timoshenko⁴, D. V. Botvenko⁴

¹Mining Institute named after N. A. Chinakala, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, ✉ordin@misd.ru;

²Institute of Computational Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

³Scientific&Design Center of VostNII LLC, Kemerovo, Russia;

⁴Joint Stock Company "Scientific Center of VostNII for Industrial and Environmental Safety in Mining Industry", Kemerovo, Russia

Abstract: It is traditionally believed that the use of high-performance mining equipment in collieries leads not only to increasing productivity of the enterprise, but also to significant increasing release of methane into the mine air. Based on this, the existing regulatory and methodological support for calculations allowed predicting the rate of methane release into the mine air and determining the required operating modes of the ventilation system to ensure mining safety. The task of this study is to investigate in practice the laws of methane release as a function of the productivity of mining equipment and to identify phenomena that affect the nature of these laws. Based on the data of air gas monitoring, the results of statistical study of methane release in 101 working faces of 33 collieries of Kuzbass are presented. In 76 working faces, parabolic law of the dependence of the methane release on the productivity of mining equipment, having peak points in relation to the rate of advance and productivity of the shearer were established with high confidence. Using the law of A. Darcy and the equation of sorption of Langmuir, it has been theoretically established that methane release from loose coal is a function inversely proportional to the linear hyperbolic dependence, and also has a peak point in relation to the rate of advance and productivity of the shearer. Analysis of the established dependence of the rate of methane release from the loose coal shows that the methane release significantly (quadratically) decreases with decreasing the rotational speed of the cutting auger and the number of cutters in the cutting line or the number of blades on the drum. Methane release also quadratically increases with increasing formation thickness and the shearer cutting width. The extreme dependence of the rate of methane release from loose coal forms two areas of allowable rate of advance and productivity of the shearer of gas factor.

Keywords: mine, coal seam, methane release, methane concentration, statistical analysis, permissible performance of working face, gas content, miner rate of advance, fractional yield.

For citation: Ordin A. A., Timoshenko A. M., Botvenko D. V. About the necessity for changing the methodical approach to the calculation of methane release rate in high-performance working faces of Kuzbass. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):82-91. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-82-91.

Введение

Современные импортные очистные комбайны, применяемые на шахтах в Кузбассе, оснащаются силовыми электроприводами высокой установленной мощностью и обладают значительной производительностью и скоростью подачи. Так, например, очистной комбайн Eickhoff SL-900 массой 90 т, используемый на шахте им. В.Д. Ялевского, имеет суммарную мощность электродвигателей приводов резания и подачи 2104 кВт. Скорость подачи комбайна достигает 48 м/мин, а производительность превышает 50 тыс. т угля в сутки. В августе 2018 г. на шахте им.

В.Д. Ялевского в лаве 5004 длиной 400 м при выемке пласта мощностью 3,8 м поставлен мировой рекорд добычи угля – 1627 тыс. т.

Однако при этом работа современных шнековых комбайнов, скребковых конвейеров и дробилок в очистных забоях приводит к переизмельчению угля. В условиях шахты «Костромовская» 69,1 % угля добывается классов «штыб» (0–6 мм) и «семечко» (6–13 мм). Аналогичную картину выхода мелких фракций угля присутствует и на многих других шахтах. Это приводит к ряду негативных последствий: снижению сортности и соответственно оптовой цены угля, а также

повышению выхода пылевых фракций и увеличению дебита метана из отбитого угля в очистных забоях.

Закономерности интенсивности метановыделения от производительности добычной техники на угольных шахтах.

Одним из действенных способов снижения дебита метана в очистных забоях является повышение производительности шнековых комбайнов. Снижение метановыделения из отбитого угля при высокой производительности очистного комбайна впервые зафиксировано специалистами АО «НЦ ВостНИИ» в 2010 г. средствами аэрогазового контроля на шахтах «Тагарышская», «Котинская», «Талдинская-Западная-1» [1]. Суть этого явления заключается в том, что при увеличении скорости подачи и производительности очистного комбайна в начальный период происходит рост метановыделения из отбитого угля, практически в соответствии с утвержденными инструкциями и методиками [2–4], а затем, после достижения некоторого максимума дебита метана, при дальнейшем росте производительности комбайна происходит снижение метановыделения. При высокой производительности очистного комбайна

(20–30 тыс. т/сут и более) существует значительное несоответствие между фактическим дебитом метана в очистных забоях и расчетными данными [1]. Так, например, на шахте «Котинская» несовпадение расчетных и фактических данных дебита метана, полученных средствами аэрогазового контроля, при производительности очистного забоя 30 тыс. т/сут составляет более чем 5 раз, а при добыче угля 37 тыс. т/сут. расчетный дебит метана превышает фактическое метановыделение более чем в 15 раз (рис. 1)!

Это явление противоречит утвержденным инструкциям [2–4] и требует более полного теоретического и статистического доказательств.

На основании информации, полученной средствами аэрогазового контроля, авторами проведен статистический анализ фактического метановыделения в 101 очистном забое 31 шахт Кузбасса. В результате с высокой степенью достоверности по 76 очистным забоям определены параболические зависимости дебита метана от производительности очистного комбайна, обладающие точками максимума (табл. 1, рис. 2).

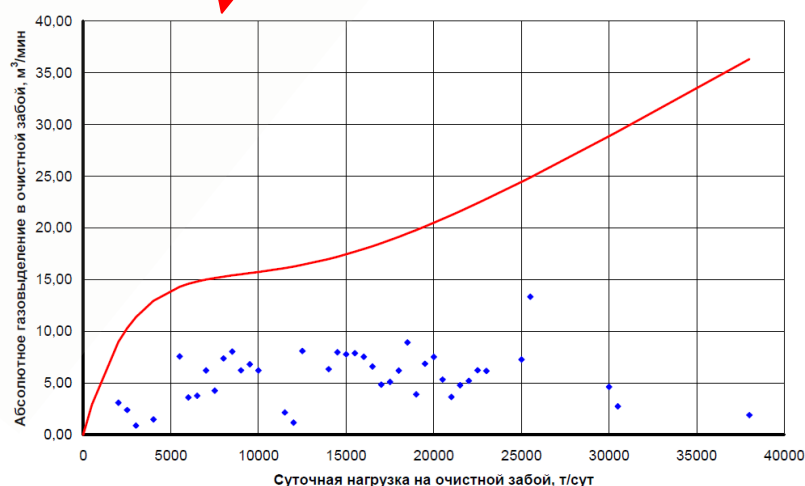


Рис. 1. Теоретическая кривая метановыделения по действующим инструкциям и фактический дебит метана в очистном забое 5203 шахты «Котинская»

Fig. 1. Theoretical methane release curve in accordance with applicable instructions and the factual methane release rate in production face 5203 of the Kotinskaya colliery

Тенденция снижения метановыделения из отбитого угля индивидуальна для каждого пласта и очистного забоя. Так, например, для шахты им. Кирова при обработке пласта «Болдыревский» снижение метановыделения начинается при производительности 6 тыс. т/сут – для очистного забоя 24-40, 10 тыс. т/сут – для очистного забоя 24-45 и 11 тыс. т/сутки для – очистного забоя 24-57.

Таким образом, статистический анализ, проведенный по 76 очистным забоям, с высокой степенью достоверности подтверждает тенденцию снижения абсолютного метановыделения из отбитого угля при высокой производительности очистного забоя.

Обоснование моделей интенсивности метановыделения на угольных шахтах. Результаты экспериментальных исследований.

$$Q(v) = \frac{180vmrk_1(P - P_a)}{\mu} \sum_{i=1}^k \frac{\beta_i(v)}{R_i^2} = \frac{180vmrk_1(P - P_a)}{\mu} \sum_{i=1}^k \frac{a_i v + b_i}{R_i^2} = 180mrk_1 \mu^{-1} (P - P_a) (-cv^2 + d), \quad (1)$$

где k – количество фракций отбитого угля; v – скорость подачи очистного комбайна, м/мин; m – мощность пласта, т; r – ширина захвата комбайна, м; k_1 – коэффициент минерализуемости угля; P , P_a – соответственно поровое давление газа внутри частицы 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 отбитого угля i -й фракции, м; a_i , b_i – коэффициенты линейных зависимостей выхода фракций от скорости подачи комбайна; c , d – коэффициенты параболической зависимости суммарного дебита метана от всех фракций угля.

Таким образом, на основании статистического анализа данных аэрогазового контроля по 76 очистным забоям Кузбасса и с учетом статистических данных выхода отдельных фракций угля установлена параболическая зависимость метановыделения из

Теоретическое объяснение снижения метановыделения из отбитого угля при высокой производительности очистного комбайна дано авторами в [6, 7]. Суть этого явления заключается в том, что с увеличением скорости подачи и производительности очистного комбайна изменяется фракционный состав отбитого угля, а именно, снижается выход мелких фракций и увеличивается выход класса крупных фракций. Зависимости выхода фракций от скорости подачи на основании статистических данных [5] имеют линейный характер, а суммарный дебит метана от всех фракций отбитого угля в соответствии с законом А. Дарси определяется в этом случае параболической зависимостью от скорости подачи комбайна.

отбитого угля, имеющая максимум относительно скорости подачи и производительности очистного комбайна.

Аналогичные параболические зависимости получены в [8] на основании статистического анализа работы очистных забоев на шахте им. А. Ф. Засядько в Донбассе.

Следует заметить, что все параболические зависимости метановыделения от производительности очистного комбайна получены с помощью статистических методов и, несмотря на достаточно высокие показатели надежности регрессионных связей, все же не раскрывают физику этого явления. Статистика не объясняет физический процесс снижения дебита метана при высокой скорости подачи и производительности очистного комбайна.

Теоретическое объяснение этого эффекта дано авторами в работе [7], в которой на основании закона А. Дарси и уравнения сорбции И. Ленгмюра, а также на основании связи скорости подачи с толщиной стружки и

частотой вращения шнека выведены экстремальные (имеющие точки максимума) зависимости дебита метана от скорости подачи (v)

и производительности (A) очистного комбайна:

$$Q(v) = \frac{720mrk_1(0,9X(1+bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0,9X) \left(\frac{v}{(\pi n n_1)^2} + \frac{h_p}{\pi n n_1} + \frac{0,25h_p^2}{v} \right)}, \text{ м}^3/\text{мин},$$

$$Q(A) = mLq + \frac{720k_1(0,9X(1+bP_a) - abP_a)_a}{\mu b(a - 0,9X) \left(\frac{A}{\gamma(mr\pi n n_1)^2} + \frac{h_p}{mr\pi n n_1} + \frac{0,25h_p^2}{A} \right)}, \text{ м}^3/\text{мин},$$
(2)

где a, b – постоянные изотермы И. Ленгмюра, для угля определяемые по [10]: $a = 49,3 \text{ м}^3/\text{т}$, $b = 0,207 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Па}$; n – частота вращения шнека, мин^{-1} ; n_1 – количество резцов на лопастях шнека в одной линии резания; h_p – расстояние между резцами на лопастях шнека;

X – природная метаноносность угля, $\text{м}^3/\text{т}$; L – длина шнека, м; q – дебит метана из угольного пласта, $\text{м}^3/\text{мин}$; γ – плотность угольной массы, $\text{т}/\text{м}^3$.

Таблица 1

Регрессионные зависимости от производительности ($A, \text{м}^3/\text{мин}$) из отбитого угля от производительности ($A, \text{т/сут}$) очистного комбайна

Regression dependences of methane release ($Q, \text{м}^3/\text{мин}$) from the loose coal on the productivity ($A, \text{т/сут}$) of a shearer

№	Очистной забой	Регрессионная зависимость	Коэффициент аппроксимации, R	Коэффициент регрессии, R	Размер выборки	Среднеквадратическое отклонение, σ	Коэффициент надежности связи, $k = R/\sigma > 3$
Шахта им. Кирова							
Пласт Водяковский							
1	24-40	$Q = -1 \cdot 10^{-7} A^2 + 0,0012A + 0,443$	0,97	0,97	13	0,017	58,26
2	24-45	$Q = -3 \cdot 10^{-8} A^2 + 0,0006A + 0,855$	0,84	0,92	20	0,036	5,62
3	24-57	$Q = -5 \cdot 10^{-7} A^2 + 0,0011A + 1,02$	0,82	0,91	14	0,048	18,82
4	24-59	$Q = -1 \cdot 10^{-7} A^2 + 0,0019A + 2,02$	0,69	0,83	25	0,062	13,40
Пласт Подновский							
5	25-85	$Q = -5 \cdot 10^{-8} A^2 + 0,0008A + 1,225$	0,89	0,94	20	0,025	38,35
6	25-86	$Q = -7 \cdot 10^{-8} A^2 + 0,001A + 0,654$	0,9	0,95	18	0,024	40,25
Шахта «Заречная», пласт Польшаевский-1							
7	90-4	$Q = -2 \cdot 10^{-8} A^2 + 0,0005A + 0,632$	0,74	0,86	16	0,068	13,23
Шахта «Есаульская», пласт 26а							
8	26-30	$Q = -1,5 \cdot 10^{-7} A^2 + 0,0015A + 0,64$	0,8	0,89	11	0,06	14,83
9	26-18	$Q = -3 \cdot 10^{-8} A^2 + 0,001A + 1,341$	0,8	0,89	10	0,063	14,14
Шахта «Абашевская», пласт 64							
10	64-204	$Q = -1,56 \cdot 10^{-7} A^2 + 0,0012A + 0,61$	0,74	0,86	13	0,072	11,93
Шахта «Талдинская-Западная-1», пласт 67							
11	67-04	$Q = -1 \cdot 10^{-7} A^2 + 0,0017A + 0,45$	0,85	0,92	15	0,039	23,8
Шахта «Котинская», пласт 52							
12	5203	$Q = -7 \cdot 10^{-9} A^2 + 0,0003A + 3,02$	0,17	0,41	52	0,115	3,6
13	5209	$Q = -1 \cdot 10^{-8} A^2 + 0,0008A + 6,02$	0,59	0,77	49	0,059	13,1
Шахта им. В.Д. Ялевского, пласт 52							
14	5210	$Q = -7 \cdot 10^{-9} A^2 + 0,0005A + 1,64$	0,63	0,79	41	0,058	13,74
Шахта им. 7 Ноября, пласт Байкаимский							
15	1380	$Q = -3 \cdot 10^{-8} A^2 + 0,0007A + 0,97$	0,54	0,73	26	0,09	8,15
Шахта «Талдинская-Западная-2», пласт 70							
16	70-06	$Q = -7 \cdot 10^{-9} A^2 + 0,0002A + 0,97$	0,49	0,7	31	0,092	7,64
...
...
Шахта «Распадская», пласт 10							
76	4-1029	$Q = -3 \cdot 10^{-8} A^2 + 0,001A + 1,64$	0,93	0,96	26	0,014	70,25

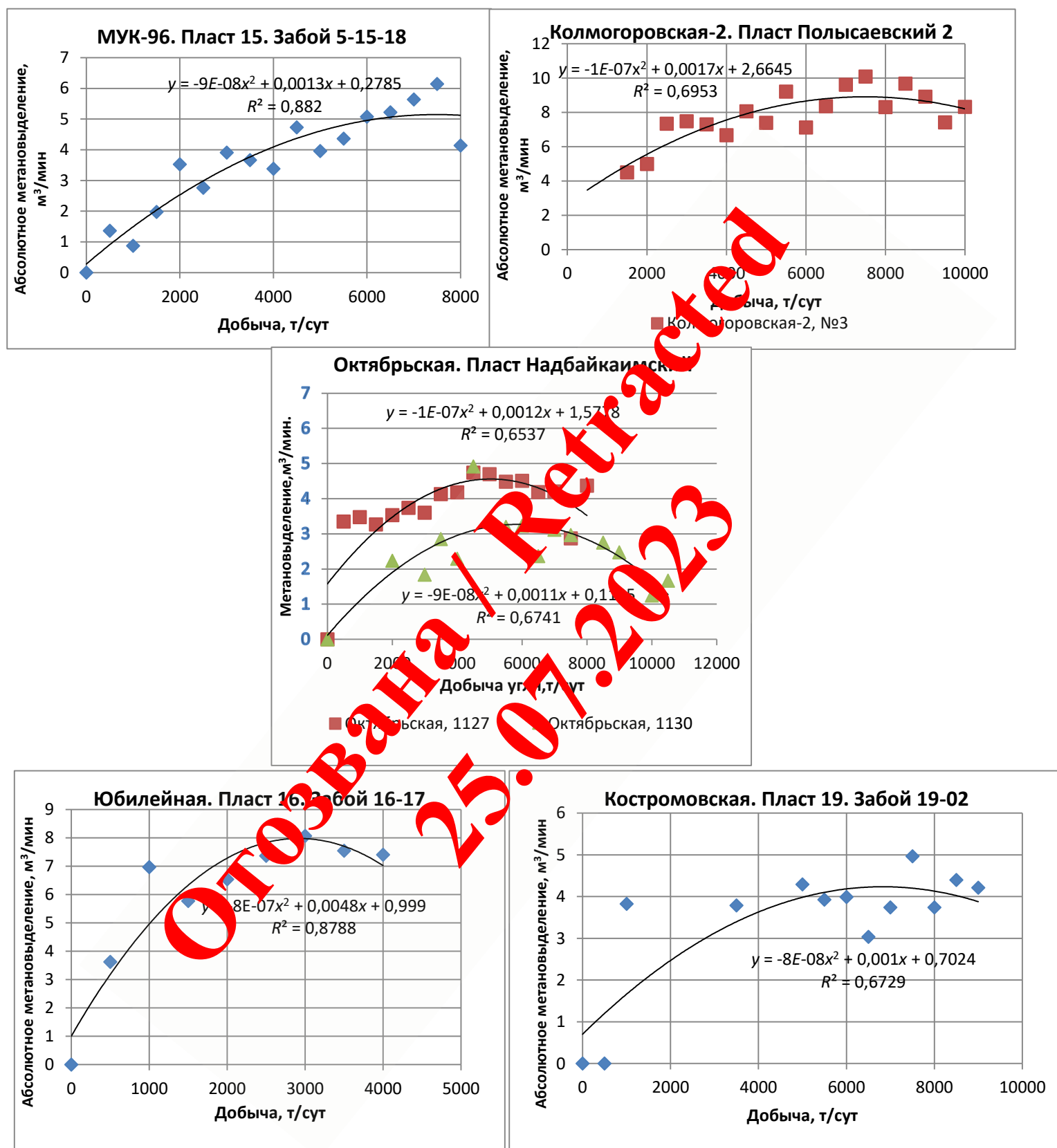


Рис. 2. Фактические данные и регрессионные зависимости абсолютного метановыделения от производительности очистного забоя на шахтах «МУК-96», «Колмогоровская-2», «Октябрьская», «Юбилейная», «Костромовская»

Fig. 2. Actual data and regression dependences of absolute methane release on the working face performance at the MUK-96, Kolmogorovskaya-2, Oktyabrskaya, Yubileynaya, Kostromovskaya collieries

Анализ зависимостей (2) показывает, что метановыделение является функцией, обратно пропорциональной линейно-гиперболической зависимости, и имеет точку максимума относительно скорости подачи и производительности очистного комбайна (рис. 3). Как видно на рис. 3, теоретическая кривая метановыделения (2) хорошо описывает данные фактического дебита метана в лаве и значительно отличается от нормативной зависимости, изображенной на рис. 1. Метановыделение из отбитого угля значительно, в квадратической зависимости, снижается при уменьшении частоты вращения шнека и количества резцов в линии резания или количества лопастей на шнеке. Метановыделение также в квадратической зависимости растет с увеличением мощности пласта и ширины захвата комбайна.

В связи с существованием точки максимума дебита метана изменяется методология расчета допустимой производительности очистного забоя по газовому фактору. По существующим инструкциям [2–4] рассчитывается значение максимально допустимой производительности (A_{\max}) очистного забоя по формуле

$$A \leq A_{\max} = \frac{0,6v_{\max}Sk_{\text{оз}}c}{k_e K_{\text{пл}}(q - q_o)K_{\text{WA}}}, \text{ т/мин, (3)}$$

где $v_{\max} = 4$ м/с – максимально допускаемая по правилам безопасности [11] скорость воздушной струи в очистном забое; S – площадь поперечного сечения лавы в свету, м^2 ; $k_{\text{оз}} = 1,05 \div 1,30$ – коэффициент, учитывающий утечки воздуха в выработанное пространство; $c = 1\%$ – допускаемая по ПБ концентрация метана на исходной струе воздуха из лавы; q, q_o – соответственно природная и остаточная метаноносность угля, $\text{м}^3/\text{т}$; K_{WA} – коэффициент, учитывающий содержание в угле природной влаги и золы; k_e – коэффициент естественной дегазации массива угля в полосе заходки выемочной машины.

Как видно на рис. 4, существование экстремальной функции концентрации метана формирует область недопустимых значений скорости подачи и соответствующей производительности очистного комбайна:

$$\begin{aligned} v_{\min} &< v < v_{\max}; \\ A_{\min} &< A < A_{\max}; \\ A_{\max} &= \gamma mrv_{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

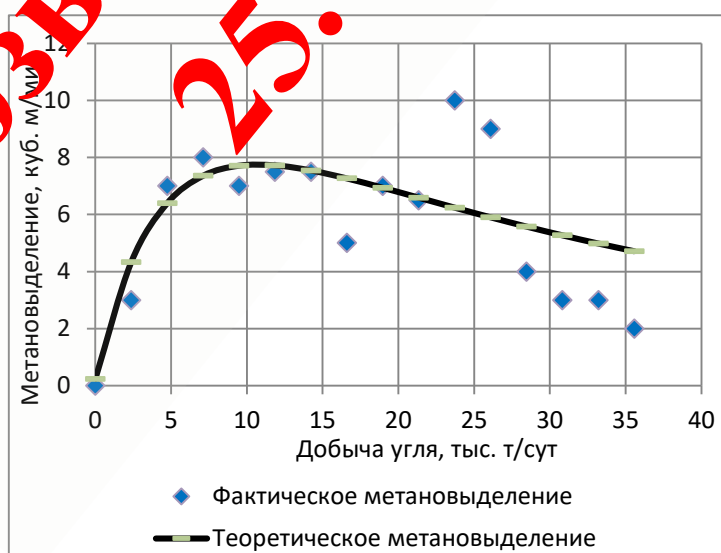


Рис. 3. Теоретическая зависимость (2) и фактическое метановыделение в лаве 5203 шахты «Котинская»

Fig. 3. Theoretical dependence (2) and actual methane release in longwall 5203 of the Kotinskaya colliery



Рис. 4. Зависимости концентрации метана на исходящей струе лавы 5005 шахты им. В. Д. Ялевского от скорости подачи комбайна для челноковой и уступной технологических схем

Fig. 4. Dependencies of methane concentration in upcast in longwall 5005 of the Named after V. D. Yalovsky colliery on shearer rate of advance for shuttle and bench process flow sheets

и соответственно область допускаемых значений производительности очистного забоя по газовому фактору заключается в выполнении одного из двух условий в зависимости от мощности комбайна:

$$A < A_{\min} \vee A > A_{\max}, \quad (5)$$

где v_{\min} , v_{\max} , A_{\min} , A_{\max} – граничные значения соответственно скорости подачи и производительности очистного комбайна по газовому фактору.

В частности, для лавы 5005 шахты им. В.Д. Ялевского эти граничные значения для челноковой технологической схемы соответственно составляют (рис. 4):

$$v_{\min} = 4,5 \text{ м/мин}, v_{\max} = 14,0 \text{ м/мин};$$

$$A_{\min} = 19,5 \text{ т/мин}, A_{\max} = 57 \text{ т/мин}.$$

На шахте им. В.Д. Ялевского осуществили максимальный вариант допускаемой нагрузки на очистной забой и отработали выемочный столб пласта 50 со скоростью очистного комбайна SL-900, превышающей 14 м/мин, и суточной нагрузкой более 50 тыс. т/сут.

Очевидно, что технологическая безопасность всего горного предприятия, добывающего уголь, будет зависеть от режимов

метановыделения. Значительное число исследований посвящено этому вопросу в России и за рубежом, но при решении задач технологической безопасности всегда потребуется достоверная расчетная модель метановыделения, связанная с технологическими режимами ведения горных работ [10–20].

Выводы

На основании статистического анализа данных аэрогазового контроля по 76 очистным забоям 33 шахт Кузбасса с высокой степенью достоверности установлена параболическая закономерность метановыделения из отбитого угля, имеющая максимум относительно скорости подачи и производительности очистного комбайна.

Теоретическое объяснение эффекта снижения метановыделения из отбитого угля при высокой производительности очистного комбайна заключается в том, что с увеличением скорости подачи и производительности очистного комбайна изменяется фракционный состав отбитого угля, а именно, снижается выход мелких фракций и увеличивается выход класса крупных фракций.

С использованием закона А. Дарси и уравнения сорбции И. Ленгмюра установлено, что метановыделение является функцией, обратно пропорциональной линейно-гиперболической зависимости, и имеет точку максимума относительно скорости подачи и производительности очистного комбайна.

Анализ установленной зависимости дебита метана из отбитого угля показывает, что метановыделение значительно, в квадратической зависимости, снижается при уменьшении частоты вращения шнека и количества резцов в линии резания или количества лопастей на шнеке. Метановыделение также квадратической зависимости растет с увеличением мощности пласта и ширины захвата комбайна.

Экстремальная зависимость дебита метана из отбитого угля формирует две области допустимых значений скорости подачи и производительности очистного комбайна по газовому фактору.

Таким образом, необходимо внести изменения в существующие методические подходы к расчету дебита метана в высокопроизводительных очистных забоях с целью учета экстремальной зависимости метановыделения от скорости подачи и производительности очистного комбайна, а при расчете допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору следует учесть возможность снижения дебита метана при значительном увеличении скорости подачи и производительности очистного комбайна.

Библиографический список

1. Тимошенко А.М., Баранов М.В., Никифоров Д.В. и др. Некоторые аспекты применения нормативных документов при проектировании высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт. *Вестник НЦ ВостНИИ*. 2010;(1):5–13.
2. *Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт*. МакНИИ, Основа. Киев, 1994. 158 с.
3. Гращенков Н.Ф., Гусаров 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 выработочного пространства с помощью газоотсасывающих установок*. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 01.12.2011 № 680. М.; 2011.
5. Забурдаев Г.С., Новикова И.А., Подображин А.С. Метано- и пылевыведение в процессе работы шнековых исполнительных органов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(53):243-249.
6. Селин А.А., Тимошенко А.М. О влиянии фракционного состава угля на метановыделение в очистном забое. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(3):104–109.
7. Ордин А.А., Тимошенко А.М. Нелинейные зависимости метановыделения от природной метаносности угольного пласта и кинематических параметров резцов очистного комбайна. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(2):110–116.
8. Бокий А.Б. Влияние уровня угледобычи на дебит парниковых газов в очистную выработку. *Сб. науч. тр. «Геотехническая механика»*. Днепропетровск. 2010;(88):247-255.
9. Плотников В.П. Вывод формулы для расчета производительности очистных комбайнов со шнековым, барабанным или корончатым исполнительным органом. *Уголь*. 2009;(9):5–7.
10. Семыкин Ю.А. *Повышение безопасности добычи угля на основе интенсификации газосорбения из пластовых скважин и совершенствования метода прогноза газообильности очистного забоя*: Дис. ... канд. техн. наук. М.: НИТУ «МИСИС», 2016.
11. *Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»*. Сер. 05. ЗАО «НТЦИППБ», 2017. Вып. 40. 198 с.
12. Плакиткина А.С. *Анализ и перспективы развития угольной промышленности основных стран мира, бывшего СССР и России в период до 2030 г.* М.: ИНЭИ РАН; 2013. 415 с.
13. Никольский А.М., Коваленко А.А., Тишков М.В., Неверов А.А., Неверов С.А. *Технология подземной отработки подкарьерных запасов в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях*. Новосибирск: Наука, 2017. 328 с.
14. Conroy P. J., Curth E. A. *Longwall Mining in Illinois, Longwall- Shortwall Mining State-of-the-Art*. SME-AIME; 1981.
15. Peng S. S., Chiang Y. S. *Longwall mining*. John Wiley & Song Inc., New York; 1984. 135 p.

16. Yu Shou Liu. *Analysis of different techniques for respirable dust control in longwall operations – particularly in reference to the Bull Seam*. Southern Coal Field. Australia; 1992. 86 p.
17. Winter J., Pineau J.P. *Effect of Nitrogen on Methane and Coal Dust Explosion in galleries*. Archivum Combustionis. (1–4).
18. Mc Pherson M. The Westray Mine Explosion. In: *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*. Krakow, EMAGE; 2001.
19. Feng K.K. Hazardous character of Canadian coal dusts. In: *Proceedings of the 20th International Conference of Safety in Mines*. Schelfield. Health and Safety Executive ed.; 1983.
20. Eckhoff R. *Dust explosions in the process Industries*. Oxford, Butterworth–Haniemann; 1991.

References

1. Timoshenko A. M., Baranova M. N., Nikiforov D. V., et al. Some aspects of the application of regulatory documents in designing high-performance extraction districts in coal mines. *Vestnik Nauchnogo centra VostNII*. 2010;1:5–15. (In Russ.).
2. *Coal Mine Ventilation Design Guide*. MakNII, Osnov Publ., Kiev; 1994. 158 p. (In Russ.).
3. Grashchenkov N. F., Petrosyan A. E., Frolov M. A. et al. *Mine Ventilation: Handbook*. Ed. K.Z. Ushakov, Moscow: Nedra Publ; 1988. 439 p. (In Russ.).
4. *Instruction for the use of mine extraction district ventilation diagram at isolated methane removal from mined-out space using gas-suction plants*. Approved by Order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision No. 680 of 12.01.2011. Moscow, 2011 (In Russ.).
5. Zaburdayev G. S., Novikova I. A., Podorozhin A. S. Methane and dust emission during operation of auger operating devices. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2008;(53):243–249. (In Russ.).
6. Ordin A.A., Timoshenko A. M. About influence of coal fractional composition on methane release at production face. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016;(3):104–109. (In Russ.).
7. Ordin A. A., Timoshenko A. M. Nonlinear dependences of methane release on natural methane content of a coal seam and on kinematic parameter of shearers cutters. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017;2:110–116 (In Russ.).
8. Boki A. B. Effect of the level of coal production on the rate of release of greenhouse gases to stopes. In: *Collection of research papers "Technical Mechanics"*. Dnepropetrovsk. 2010;(88):247–255. (In Russ.).
9. Plotnikov V. P. Derivation of the formula for calculating the performance of shearers with auger, drum, or crown operating device. *Ugol*. 2009;(9):5–7 (In Russ.).
10. Semykin Yu. A. *Improving safety of coal mining based on intensification of gas release from formation boreholes and improving the method for predicting gas content at production face*. Ph.D. thesis in Engineering Science. Moscow: NTU MISiS; 2016. (In Russ.).
11. *Federal norms and rules for industrial safety "Safety rules in coal mines"*. Series 05. CJSC NTTsIPPB. 2017;40. 198 p. (In Russ.).
12. Plakina A.S. *Analysis and prospects of development of coal industry in developed countries, the former USSR, and Russia up to 2030*. Moscow: INEI RAS Publ.; 2013. 415 p. (In Russ.).
13. Nikolsky A.M., Kovalenko A.A., Tishkov M.V., Neverov A.A., Neverov S.A. *Method of underground mining of under-pit reserves in difficult mining and geological conditions*. Novosibirsk: Nauka Publ. 2017; 328 p. (In Russ.).
14. Conroy P. J., Curth E. A. *Longwall Mining in Illinois, Longwall- Shortwall Mining State-of-the-Art*. SME-AIME; 1981.
15. Peng S. S., Chiang Y. S. *Longwall mining*. John Wiley & Song Inc., New York; 1984. 135 p.
16. Yu Shou Liu. *Analysis of different techniques for respirable dust control in longwall operations – particularly in reference to the Bull Seam*. Southern Coal Field. Australia; 1992. 86 p.
17. Winter J., Pineau J.P. *Effect of Nitrogen on Methane and Coal Dust Explosion in galleries*. Archivum Combustionis. (1–4).
18. Mc Pherson M. The Westray Mine Explosion. In: *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*. Krakow, EMAGE; 2001.
19. Feng K.K. Hazardous character of Canadian coal dusts. In: *Proceedings of the 20th International Conference of Safety in Mines*. Schelfield. Health and Safety Executive ed.; 1983.
20. Eckhoff R. *Dust explosions in the process Industries*. Oxford, Butterworth–Haniemann; 1991.