

УДК 622.33.013.03

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ
В ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ КУЗБАССА**

А. А. Ордин¹⁻³, А. М. Тимошенко⁴, Д. В. Ботвенко⁴

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

²Институт вычислительной техники СО РАН,
просп. Академика Лаврентьева, 6, 630090, г. Новосибирск, Россия

³ООО “НПЦ ВостНИИ”, ул. Институтская, 1, 650002, г. Кемерово, Россия

⁴АО “НЦ ВостНИИ”, ул. Институтская, 3, 650002, г. Кемерово, Россия

Приведены результаты статистического анализа метановыделения в очистных забоях шахт Кузбасса. Установлены параболические зависимости метановыделения, имеющие точки максимума относительно скорости подачи и производительности очистного комбайна. Выявлено, что метановыделение из отбитого угля 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 в квадратической зависимости снижается при уменьшении частоты вращения шнека и количества резцов в линии резания или количества лопастей на шнеке, но также в квадратической зависимости растет с увеличением мощности пласта и ширины захвата комбайна.

Шахта, угольный пласт, метановыделение, концентрация метана, статистический анализ, допускаемая производительность очистного забоя, газовый фактор, скорость подачи комбайна, выход фракций

DOI: 10.15372/FTPRPI20200212

Современные импортные очистные комбайны, применяемые на шахтах Кузбасса, обладают высокой мощностью электродвигателей, производительностью и скоростью подачи. Так, 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 данной шахте в лаве 5004 длиной 400 м при выемке пласта мощностью 3.8 м поставлен мировой рекорд добычи угля — 1627 тыс. т. При этом работа современных шнековых комбайнов, скребковых конвейеров и дробилок в очистных забоях приводит к переизмельчению угля. На шахте “Костромовская” 69.1 % угля добывается класса “штыб” (0–6 мм) и “семечко” (6–13 мм). Аналогичный выход мелких фракций угля присутствует и на многих других шахтах. Это приводит к ряду негативных последствий: снижению сортности и, соответственно, оптовой цены угля, повышению выхода пылевых фракций и увеличению дебита метана из отбитого угля в очистных забоях.

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 специали-

стами 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 [2–4], а после достижения некоторого максимума дебита метана, при дальнейшем росте производительности комбайна наблюдается 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]. На шахте “Котинская” несовпадение расчетных и фактических данных дебита метана, полученных средствами аэрогазового контроля, при производительности очистного забоя 30 000 т/сут составило более чем 5 раз, а при добыче угля 37000 т/сут расчетный дебит метана превысил фактическое метановыделение более чем в 15 раз (рис. 1). Это явление противоречит утвержденным инструкциям [2–4] и требует более полного теоретического и статистического доказательства.



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

На основании информации, полученной средствами аэрогазового контроля, проведен статистический анализ фактического метановыделения в 101 очистном забое 33 шахт Кузбасса. В результате с высокой степенью достоверности по 76 очистным забоям определены параболические зависимости, обладающие точками максимума дебита метана от производительности очистного комбайна (таблица, рис. 2).

Тенденция снижения метановыделения из отбитого угля индивидуальна для каждого пласта и очистного забоя. Например, для шахты им. Кирова при отработке пласта “Болдыревский” снижение метановыделения начинается при производительности 6 000 т/сут для очистного забоя 24-40, 10 000 т/сут — для очистного забоя 24-45 и 11 000 т/сут для — очистного забоя 24-57.

Статистический анализ, выполненный по 76 очистным забоям, с высокой степенью достоверности подтверждает тенденцию снижения абсолютного метановыделения из отбитого угля при высокой производительности очистного забоя. Теоретическое объяснение этого явления при высокой производительности очистного комбайна дано в [5–7]. С увеличением скорости подачи и производительности очистного комбайна изменяется фракционный состав отбитого угля — снижается выход мелких и увеличивается выход класса крупных фракций. Зависимость выхода фракций от скорости подачи на основании статистических данных [5] имеет линейный характер, а суммарный дебит метана от всех фракций отбитого угля в соответствии с законом А. Дарси определяется параболической зависимостью от скорости подачи комбайна:

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

$$= 180mrk_1 \mu^{-1} (P - P_a) (-cv^2 + d), \quad (1)$$

где k — количество фракций отбитого угля; v — скорость подачи очистного комбайна, м/мин; m — мощность пласта, м; r — ширина захвата комбайна, м; k_1 — коэффициент проницаемости 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.

Регрессионные зависимости метановыделения Q (м³/мин) из отбитого угля от производительности A (т/сут) очистного комбайна (выборка из 101 очистного забоя)

№ п/п	Очистной забой	Регрессионная зависимость	R^2	R	Размер выборки	σ	$k = R / \sigma > 3$
Шахта им. Кирова							
Пласт "Болдыревский"							
1	24-40	$Q = -1 \cdot 10^{-7} A^2 + 0.0012A + 0.443$	0.94	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	$Q = -5 \cdot 10^{-8} A^2 + 0.0011A + 1.02$	0.82	0.91	14	0.048	18.82
4	24-59	$Q = -5 \cdot 10^{-7} A^2 + 0.0019A + 2.42$	0.69	0.83	25	0.062	13.40
Пласт "Поленовский"							
5	25-85	$Q = -3 \cdot 10^{-8} A^2 + 0.0008A + 1.225$	0.89	0.94	20	0.025	38.35
6	25-86	$Q = -7 \cdot 10^{-8} A^2 + 0.001A + 0.654$	0.90	0.95	18	0.024	40.25
Шахта Заречная, пласт "Польсаевский-1"							
7	904	$Q = -2 \cdot 10^{-8} A^2 + 0.0005A + 0.632$	0.74	0.86	16	0.068	13.23
Шахта Есаульская, пласт 26а							
8	26-30	$Q = -1.5 \cdot 10^{-7} A^2 + 0.0015A + 0.640$	0.80	0.89	11	0.06	14.83
9	26-18	$Q = -3 \cdot 10^{-8} A^2 + 0.0010A + 1.341$	0.80	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	23.80
Шахта Котинская, пласт 52							
12	5203	$Q = -7 \cdot 10^{-9} A^2 + 0.0003A + 3.02$	0.17	0.41	52	0.115	3.60
13	5209	$Q = -1 \cdot 10^{-8} A^2 + 0.0008A + 6.02$	0.59	0.77	49	0.059	13.10
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	0.090	8.15
Шахта Талдинская-Западная-2, пласт 70							
16	70-06	$Q = -7 \cdot 10^{-8} A^2 + 0.0002A + 0.97$	0.49	0.70	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

Примечание: R^2 — коэффициент аппроксимации; R — коэффициент регрессии; σ — среднее квадратическое отклонение; $k = R / \sigma > 3$ — коэффициент надежности связи

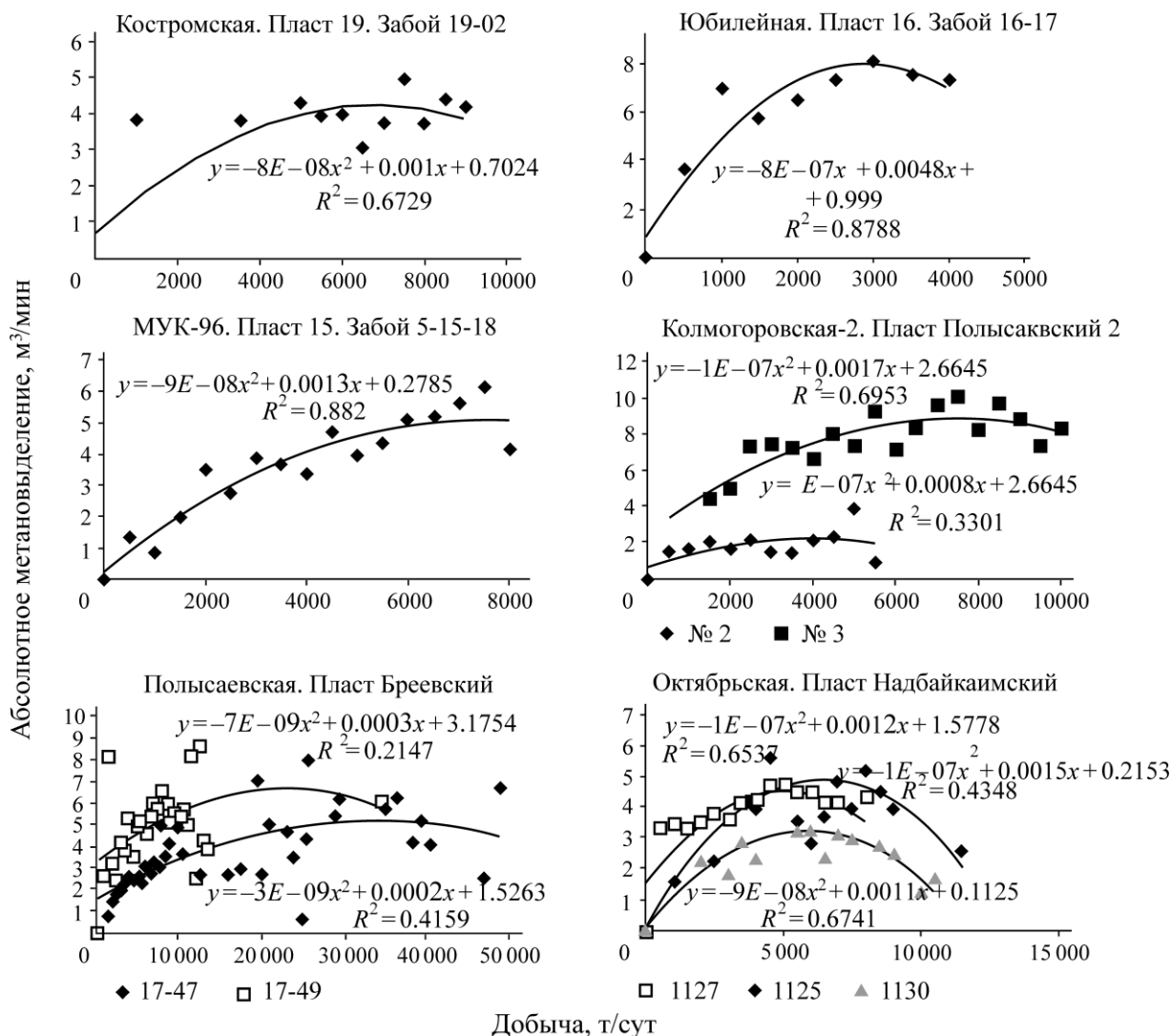


Рис. 2. Фактические данные и регрессионные зависимости абсолютного метановыделения от производительности очистного забоя на шахтах Кузбасса

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 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 [9]. Статистика не объясняет физический процесс снижения дебита метана при высокой скорости подачи и производительности очистного комбайна.

Теоретическое объяснение данного эффекта дано 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:

$$Q(v) = \frac{720mrk_1(0.9X(1 + bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0.9X) \left(\frac{v}{(\pi n n_1)^2} + \frac{h_p}{\pi n n_1} + \frac{0.25h_p^2}{v} \right)},$$

$$Q(A) = mLq + \frac{720k_1(0.9X(1 + bP_a) - abP_a)}{\mu b(a - 0.9X) \left(\frac{A}{\gamma(mr\pi n n_1)^2} + \frac{h_p}{mr\pi n n_1} + \frac{0.25\gamma h_p^2}{A} \right)},$$

где a, b — постоянные изотермы 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 лавы, м; q — дебит метана из угольного пласта, $\text{м}^3/\text{мин}$; γ — плотность угольной массы, $\text{т}/\text{м}^3$.

Анализ (2) показывает, что метановыделение является функцией, обратно пропорциональной линейно-гиперболической зависимости, и имеет точку максимума относительно скорости подачи и производительности очистного комбайна (рис. 3). Согласно рис. 3, теоретическая кривая метановыделения (2) хорошо описывает данные фактического дебита метана в лаве и значительно отличается от нормативной зависимости, представленной на рис. 1. Метановыделение из отбитого угля 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 при увеличении мощности пласта и ширины захвата комбайна.

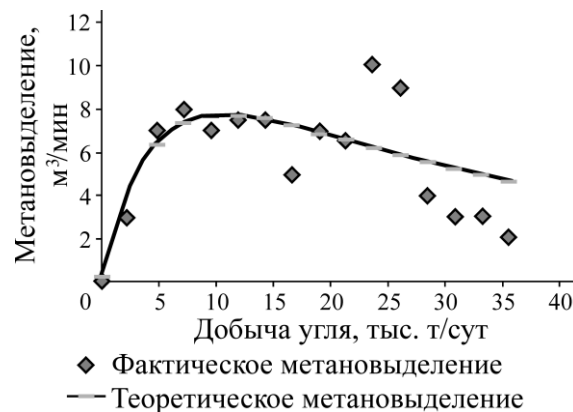


Рис. 3. Теоретическая зависимость и фактическое метановыделение в лаве 5203 шахты “Котинская”

При подземной разработке метаноносных угольных пластов большое внимание в России и за рубежом уделяется вопросам безопасности горных работ [10–20]. 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:

$$A \leq A_{\max} = \frac{0.6v_{\max}Sk_{0.3}c}{k_e K_{\text{пл}}(q - q_o)K_{WA}},$$

где $v_{\max} = 4 \text{ м/с}$ — максимально допускаемая по правилам безопасности [11] скорость воздушной струи в очистном забое; S — площадь поперечного сечения лавы в свету, м^2 ; $k_{0.3} = 1.05 - 1.3$ — коэффициент, учитывающий утечки воздуха в выработанное пространство;

$c = 1\%$ — допустимая концентрация метана на исходящей струе воздуха из лавы; q, q_0 — 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.

Существование экстремальной функции концентрации метана (рис. 4) формирует область недопустимых значений скорости подачи и соответствующей производительности очистного комбайна:

$$v_{\min} < v < v_{\max}; A_{\min} < A < A_{\max}; A_{\min} = \gamma m r v_{\min}; A_{\max} = \gamma m r v_{\max}. \quad (4)$$

Область допустимых значений производительности очистного забоя по газовому фактору заключается в выполнении одного из двух условий в зависимости от мощности комбайна:

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

здесь $v_{\min}, v_{\max}, A_{\min}, A_{\max}$ — 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 составляют (рис. 4): $v_{\min} = 4.8$, $v_{\max} = 14.0$; $A_{\min} = 19.5$, $A_{\max} = 57$ т/мин.

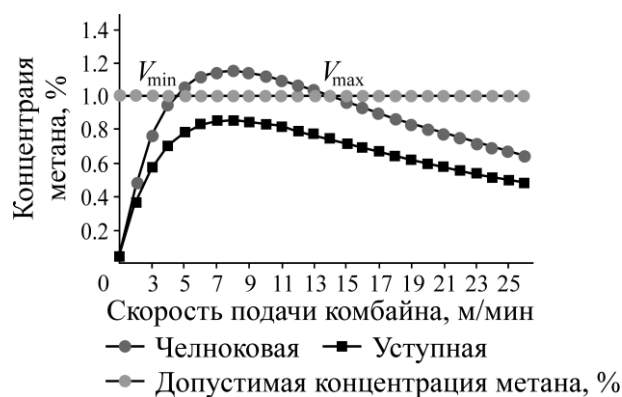


Рис. 4. Зависимости концентрации метана на исходящей струе лавы 5005 шахты им. В. Д. Ялевского от скорости подачи комбайна для челноковой и уступной технологических схем

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

ВЫВОДЫ

На основании статистического анализа данных аэрогазового контроля по 76 очистным забоям 33 шахт Кузбасса с высокой степенью достоверности установлена параболическая зависимость метановыделения из отбитого угля, имеющая максимум относительно скорости подачи и производительности очистного комбайна. Теоретическое объяснение эффекта снижения метановыделения из отбитого угля заключается в том, что с увеличением скорости подачи и производительности очистного комбайна изменяется фракционный состав отбитого угля — снижается выход мелких и увеличивается выход класса крупных фракций.

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

Показано, что метановыделение в квадратической зависимости снижается при уменьшении частоты вращения шнека и количества резцов в линии резания или количества лопастей на шнеке и также в квадратической зависимости растет с увеличением мощности пласта и ширины захвата комбайна. Экстремальная зависимость дебита метана из отбитого угля формирует две области допускаемых значений скорости подачи и производительности очистного комбайна по газовому фактору.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимошенко А. М., Баранова М. Н., Никифоров Д. В. Некоторые аспекты применения нормативных документов при проектировании высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт. — Кемерово: Вестн. НЦ ВостНИИ, 2010. — № 1. — С. 5–15.
2. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. МакНИИ. — Киев: Основа, 1994. — 158 с.
3. Гращенков Н. Ф., Петросян А. Э., Фролов М. А. Рудничная вентиляция: справочник. — 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. Утверждена приказом № 680 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 01.12.2011. — М., 2011.
5. Забурдяев Г. С., Новикова И. А., Подображин А. С. Метано-и пылевыведение в процессе работы шнековых исполнительных органов // ГИАБ. — 2008. — № 53. — С. 15–22.
6. Ордин А. А., Тимошенко А. М. О влиянии фракционного состава угля на метановыделение в очистном забое // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 104–109.
7. Ордин А. А., Тимошенко А. М. Нелинейные зависимости метановыделения от природной метаносности угольного пласта и кинематических параметров резцов очистного комбайна // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 110–116.
8. Бокий А. Б. Влияние уровня угледобычи на дебит парниковых газов в очистную выработку / “Геотехническая механика”: сб. науч. тр., Вып. 88. — Днепрпетровск, 2010. — С. 25–31.
9. Плотников В. П. Вывод формулы для расчета производительности очистных комбайнов со шнековым, барабанным или корончатым исполнительным органом // Уголь. — 2009. — № 9. — С. 5–7.
10. Семькин Ю. А. Повышение безопасности добычи угля на основе интенсификации газосорбции из пластовых скважин и совершенствования метода прогноза газообильности очистного забоя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: НИТУ МИСиС, 2016. — 16 с.
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. and Curth E. A.** Longwall mining in illinois, Longwall, Shortwall Min. State-of-the-Aft, SME-AIME, 1981.
15. **Peng S. S. and 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 — partikulary in reference to the Bull Seam, Southern Coal Field, Australia, 1992. — 86 p.
17. **Winter J. and Pineau J. P.** Effect of nitrogen on methane and coal dust explosion in galleries, Archivum Combastionis, 1995, No. 1–4.
18. **Mc Pherson M.** The westray mine explosion, Proc. of the 7th Int. Mine Ventilation Congr., Krakow, EMAGE. — 2001.
19. **Feng K. K.** Hazardous character of canadian coal dusts, Proc. of the 20th Int. Conf. of Safety in Mines, Schelfield, Health and Safety Executive ed, 1983.
20. **Eckhoff R.** Dust explosions in the process Industries, Oxford, Butterworth, Haniemann, 1991.

Поступила в редакцию 04/III 2020

После доработки 14/III 2020

Принята к публикации 10/IV 2020