

УДК 622.012.3:622.8:622.8:622:014.2:622:063.543

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОПУСТИМОЙ НАГРУЗКИ  
НА ОЧИСТНОЙ УГОЛЬНЫЙ ЗАБОЙ ПО ГАЗОВОМУ ФАКТОРУ**

**С. В. Сластунов<sup>1</sup>, Г. Г. Каркашадзе<sup>1</sup>, К. С. Коликов<sup>1</sup>, Г. П. Ермак<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Московский государственный горный университет,  
Ленинский проспект, 6, 119991, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Управление по надзору в угольной промышленности Ростехнадзора,  
ул. А. Лукьянова, 4, стр. 1, 105066, Москва, Россия*

Представлена методика расчета допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору, основанная на решении уравнений эмиссии метана в очистной забой из угольного пласта, пород кровли и почвы. В модели учитывается проницаемость, параметры сорбции угля, пористость, мощность пласта, длина очистного забоя, давление газа, а также разрешенная по нормам техники безопасности концентрация метана в исходящей вентиляционной струе. Модель реализована численно для обоснования плановых нагрузок на очистной забой при разработке угольных пластов.

*Уголь, метан, газоносность, давление, сорбция, массоперенос, допустимая нагрузка*

В действующих нормативных руководствах [1, 2] по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания очистных забоев угольных шахт, рекомендованы расчетные формулы, при обосновании которых реализован эмпирический подход, основанный на имевшемся в 70-х годах прошлого века производственном опыте разработки угольных пластов. Однако описанные в руководствах формулы не учитывают фундаментальные физические процессы, происходящие при добыче угля, например массоперенос метана под действием градиента давления с учетом механизма сорбции. Притоки метана в очистной забой зависят от физико-механических свойств массива, таких как проницаемость, пористость угольного пласта и вмещающих пород, пластовое давление метана, глубина разработки, распределение горного давления и др. По этой причине действующие нормативные руководства по расчету безопасной нагрузки на очистной забой по газовому фактору отражают реальные условия весьма приближенно, без учета физических свойств и процессов массопереноса в массиве.

Большой практический интерес представляет получение расчетной зависимости, учитывающей фильтрационные и геомеханические процессы в породном массиве и описывающей допустимую нагрузку на очистной забой в зависимости от исходной газоносности угольного пласта и пластового давления метана, а также определение уровня заблаговременной дегазации пластов до величины газоносности, при которой будет обеспечена безопасная и высокопроизводительная работа добычного участка шахты [3]. Современная фундаментальная наука нако-

пила множество теоретических разработок и программ компьютерного моделирования, способных дать решение этой весьма актуальной для горной практики задачи. Ниже представлено одно из возможных ее решений.

Схема очистного забоя в системе разработки угольного пласта длинными столбами показана на рис. 1. В очистной забой метан поступает из различных источников, включая угольный забой, породы кровли, почвы, отбитый уголь и выработанное пространство. Воздух через вентиляционный штрек 2 направляют в очистную выработку 1 и далее в откаточный штрек 3. Добычу угля производят комбайном 4: на прямом ходе — отбойка угля, на обратном — зачистка угольного забоя перед очередным циклом заходки.

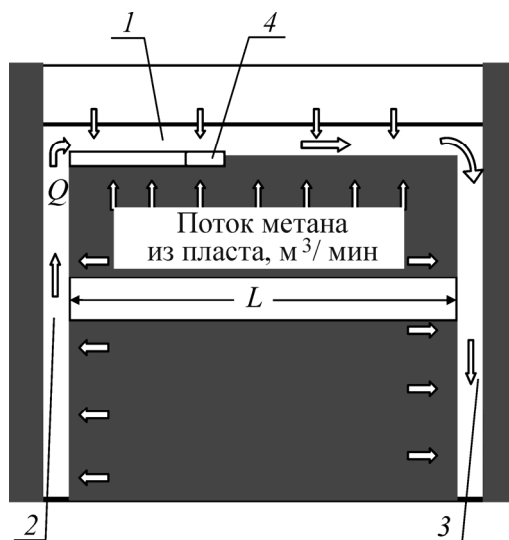


Рис. 1. Схема к расчету нагрузки на очистной забой по газовому фактору: 1 — очистная выработка (лева); 2 — вентиляционный штрек; 3 — откаточный штрек; 4 — очистной комбайн;  $Q$  — расход воздуха на входе в очистную выработку,  $\text{м}^3/\text{мин}$

Как свидетельствует практика, максимальный приток метана в исходящую струю имеет место при расположении очистного комбайна 4 на участке сопряжения лавы с откаточным штреком 3, а минимальный — на сопряжении с вентиляционным штреком 2. При этом метан в лаву поступает неравномерно и наибольшая интенсивность выделения метана реализуется в месте отбойки угля комбайном.

Фильтрация метана из угольного пласта происходит под давлением свободного газа, заключенного в каналах пласта. В нетронутом угольном пласте на большом удалении от свободной поверхности забоя реализуется пластовое давление, значение которого в газоносных пластах может достигать 4 МПа и более. Высокие пластовые давления с учетом проницаемости угля являются главными причинами взрывоопасных притоков метана в очистной забой.

Теоретически процесс фильтрации газа в трещиновато-пористой среде в изотермических условиях описывается дифференциальным уравнением, отражающим линейный закон фильтрации Дарси, закон сохранения массы и уравнение состояния газа [4]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ m\rho + (1-m) \frac{abp}{1+ap} \right] - \text{div} \left( \frac{k}{\mu} \rho \text{grad} p \right) = 0, \quad (1)$$

где  $m$  — пористость;  $k$  — проницаемость;  $\mu$  и  $\rho$  — вязкость и плотность газа;  $p$  — давление;  $a$  и  $b$  — эмпирические константы в изотерме Ленгмюра.

В декартовой системе координат  $(x, y, z)$  задано начальное распределение давления

$$p(x, y, z, 0) = p_0(x, y, z),$$

которое в общем случае зависит от длительности ремонтной смены, скорости движения комбайна в лаве, ширины заходки комбайна и др. Проведем оценку этой величины в случае нахождения угольного забоя в нетронутом состоянии в течение всей ремонтной смены длительностью 6 ч. Рассмотрим в одномерной постановке случай наибольшей интенсивности притока метана в очистной забой, когда давление в пласте в начальный момент времени  $t = 0$  распределено равномерно и равно пластовому  $P_1$ :

$$p(x, 0) = P_1. \quad (2)$$

Давление на свободной поверхности равно атмосферному  $P_0$ , а на бесконечности скорость фильтрации нулевая:

$$p(0, t) = P_0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \rightarrow 0, \text{ при } x \rightarrow \infty.$$

На рис. 2 представлены результаты решения уравнения (1) при условиях (2), (3) в виде двух кривых распределения давления в пласте центральной части лавы в конце ремонтной смены, т. е. через  $T = 6$  ч после остановки комбайна. Как свидетельствуют расчеты, в пласте с проницаемостью 0.05 мД к концу ремонтной смены дегазация происходит на глубину не более одного метра. При более высокой проницаемости угля 0.5 мД в призабойной зоне давление метана на этой же глубине понижается на 23 %.

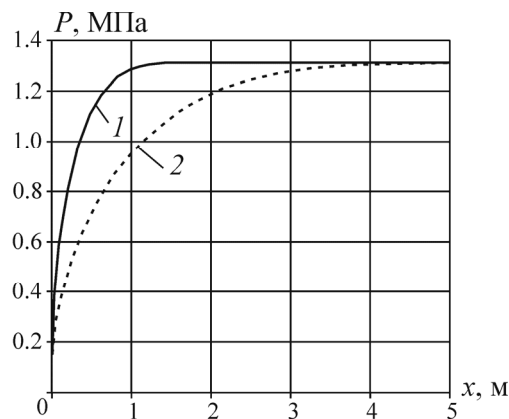


Рис. 2. Распределение давления метана в пласте в конце ремонтной смены при  $m=0.045$ ;  $a = 0.207 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$ ;  $b = 60 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu = 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ : 1 —  $k = 0.05 \text{ мД}$ ; 2 —  $k = 0.5 \text{ мД}$

С практической точки зрения важно учитывать, что интенсивная дегазация пласта в течение ремонтной смены создает условия для производительной работы очистного комбайна по крайней мере в первую смену. При этом для прогнозирования допустимой нагрузки на очистной забой необходим учет всех источников метана в течение технологического процесса отбойки угля.

Выполним расчет притока метана из пласта в очистную выработку. Удельный объемный поток метана в квазиодномерной постановке задачи определяется по закону Дарси:

$$q(x, t) = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p(x, t)}{\partial x}.$$

Предположим, что фильтрационный поток метана из лавы в выработанное пространство плоскопараллельный. В этом случае при скорости движения комбайна  $v$  и его расположении на конечном участке лавы длиной  $L$  интегральный приток метана  $Q_1(v)$  в очистную выработку со свободной поверхности забоя определяется интегрированием:

$$Q_1(v) = H \int_0^L q_1(0, (L-y)/v) dy.$$

Аналогичные допущения приводят к формулам для расчета притока метана из пород кровли  $Q_2(v)$  и почвы  $Q_3(v)$ , обнажаемых в процессе отбойки угля комбайном:

$$Q_2(v) = \Delta h \int_0^L q_2(0, (L-y)/v) dy; \quad (4)$$

$$Q_3(v) = \Delta h \int_0^L q_3(0, (L-y)/v) dy, \quad (5)$$

где  $\Delta h$  — ширина заходки.

Из пород кровли и почвы в очистную выработку метан может поступать также из места соприкосновения крепи в очистной выработке с вмещающими породами. Эти источники аналогичны тем, которые рассчитываются по формулам (4) и (5), но с той разницей, что время действия этих источников на момент отбойки угля комбайном больше на время одной заходки  $L/v$  и время  $\Delta t$  на подготовку к обратному движению комбайна. Поэтому интенсивность этих источников меньше, чем на участках свежего обнажения. Запишем расчетные зависимости для источников метана из-под крепи:

$$Q_{22}(v) = \Delta h \int_0^L q_2(0, (2L-y)/v + \Delta t) dy;$$

$$Q_{33}(v) = \Delta h \int_0^L q_3(0, (2L-y)/v + \Delta t) dy.$$

Очевидно, что пластовое давление газа на большом удалении от свободной поверхности одинаково во всех перечисленных случаях.

Еще одним источником выделения метана является отбитый уголь. Принимаем во внимание, что отбитый уголь дезинтегрирован и часть  $\chi$  свободного метана, заключенного в поровом пространстве под средним давлением  $P_3(t)$ , выходит из угля в очистную выработку. В этом случае темп поступления метана прямо пропорционально зависит от скорости движения комбайна в процессе отбойки угля:

$$Q_4(v) = \chi m_1 H \Delta h v P_3(t) / P_0.$$

Среднее давление метана в поровом пространстве измельченного угля на участке отбойки определим как средневзвешенное на ширине  $\Delta h$  второй заходки комбайна в момент его подхода к конечному участку:

$$P_3(t) = \frac{1}{\Delta h} \int_{\Delta h}^{2\Delta h} p(x, t) dx.$$

Таким образом, суммарный приток метана из всех рассмотренных источников составляет

$$Q_{\Sigma}(v) = Q_1(v) + Q_2(v) + Q_{22}(v) + Q_3(v) + Q_{33}(v) + Q_4(v). \quad (6)$$

Допустимый по нормам техники безопасности поток метана  $Q_0$  в вентиляционной струе на выходе из очистной выработки равен

$$Q_0 = K_1(C_0 - C_1)Q_{\Sigma},$$

где  $C_0$  — допустимое по нормам техники безопасности объемное содержание метана в струе на выходе из очистной выработки;  $C_1$  — концентрация метана в штреке на входе в очистной забой;  $K_1$  — коэффициент, учитывающий притоки метана из выработанного пространства и потери свежей струи воздуха в очистной выработке, определяется по результатам замеров в ремонтную смену и находится в пределах 0.8–1.5 [5].

Расход вентиляционного потока в очистной выработке ограничен максимально допустимой скоростью воздуха  $V_{\max}$  в минимальном поперечном сечении  $S$  очистной выработки:

$$Q = V_{\max}S. \quad (7)$$

На рис. 3 представлены результаты расчета суммарного притока метана  $Q_{\Sigma}(v)$  в очистную выработку из всех перечисленных источников. Точка пересечения зависимостей (6) и (7) на рис. 3 характеризует максимально допустимую скорость ( $v_1 = 1.91$  м/мин) движения очистного комбайна, при которой удовлетворяются требования безопасности по газовому фактору. Указанная скорость движения комбайна находится из решения нелинейного уравнения

$$Q_{\Sigma}(v_1) = Q_0.$$

Для расчета суточной нагрузки на очистной забой с учетом трехсменной работы и технологических остановок комбайна в течение  $t_0$  и времени  $t_{123}$  перед циклами производительной заходки комбайна следует использовать коэффициент машинного времени  $K_3$ , учитывающий эти непроизводительные потери времени:

$$K_3 = \frac{L/v_1}{L/v_1 + t_{123}}(1 - t_0/T).$$

Примем также во внимание величину усредненного за месяц коэффициента надежности работы и использования комбайна  $K_0$ .

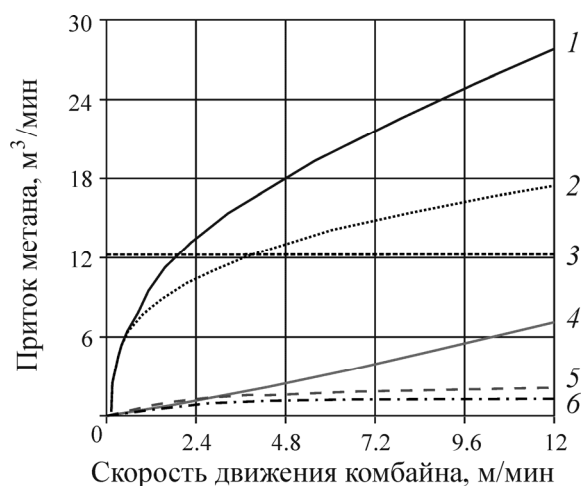


Рис. 3. Приток метана в исходящую струю в зависимости от скорости движения комбайна: 1 — все притоки метана; 2 — приток из угольного забоя; 3 — предельно допустимый приток метана по требованиям безопасности; 4 — приток из отбитого угля; 5 — приток из кровли и почвы; 6 — приток из-под крепи

Следовательно, суточная нагрузка на очистной забой в процессе работы комбайна с учетом указанных коэффициентов использования составляет

$$A = K_0 K_3 \rho_1 H \Delta h v_1.$$

Разработанная методика расчета допустимой нагрузки на очистной забой позволяет оперативно проводить необходимые вычисления. Сдерживающим фактором является ограниченное количество необходимых физических параметров, имеющих в горно-геологической документации и отчетах шахты. Например, проницаемость пород, параметры сорбции Ленгмюра и пластовое давление метана требуют проведения дополнительных экспериментальных исследований. Другим путем является использование вероятного диапазона значений по сопоставлению с данными практики (например, лавы-аналога).

Продемонстрируем практический пример, выполненный для условий шахты им. С. М. Кирова (ОАО «СУЭК-Кузбасс»), пласт «Болдыревский». Исходные данные приведены в таблице.

| Свойство, параметр  |   | Значения параметров                  |
|---|---|--------------------------------------|
| Пористость, %   | Угольный пласт $m_1$  | 4.5                                  |
|   | Кровля $m_2$  | 4.0                                  |
|   | Почва $m_3$   | 4.0                                  |
| Проницаемость   | Угольный пласт $k_1$ , мД   | 0.35                                 |
|   | Кровля $k_2$ , мД   | 0.1                                  |
|   | Почва $k_3$ , мД  | 0.1                                  |
| Константы сорбции Ленгмюра  | $a$ , Па <sup>-1</sup>  | $1.242 \cdot 10^{-6}$                |
|   | $b$ , кг/м <sup>3</sup>   | 16.43                                |
| Пластовое давление метана $P_1$ , МПа   |   | 1.308                                |
| Плотность угля $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>   |   | 1280                                 |
| Мощность пласта $H$ , м   |   | 2.23                                 |
| Высота выемки угля комбайном из пласта, м   |   | 2.23                                 |
| Длина очистного забоя $L$ , м   |   | 300                                  |
| Ширина заходки комбайна $\Delta h$ , м  |   | 0.8                                  |
| Минимальное сечение очистной выработки $S$ , м <sup>2</sup>   |   | 6.8                                  |
| Максимально допустимая скорость вентиляционного потока в очистной выработке $V_{\max}$ , м/с  |   | 4.0                                  |
| Коэффициент надежности работы и использования комбайна (усредненный за месяц) $K_3$   |   | 0.95                                 |
| Длительность концевой операции комбайна $\Delta t$ , с  |   | 300                                  |
| Скорость движения комбайна при зачистке перед циклом заходки $v_2$ , м/с  |   | 0.3                                  |
| Концентрация метана в воздушном потоке в штреке на входе в очистной забой $C_1$   |   | 0.001                                |
| Допустимое по нормам техники безопасности относительное объемное содержание метана в вентиляционной струе на выходе из очистной выработки $C_0$ |   | 0.01                                 |
| Режим работы очистного забоя  | Количество рабочих смен в сутках (3 рабочие, 1 ремонтная)           | $4 = (3 + 1)$                        |
|   | Длительность рабочей смены, ч                                       | 6                                    |
|   | Длительность ремонтной смены, ч                                     | 6                                    |
|   | Время остановки комбайна в начале и конце рабочей смены $t_0$ , мин | $10 + 10 = 20$                       |
|   | Время перед циклами производительной заходки комбайна $t_{123}$ , с | $t_{123} = 2\Delta t + L/v_2 = 1500$ |
| Коэффициент раскрытия трещин в отбитом угле $\chi$  |   | 0.85                                 |
| Коэффициент, учитывающий притоки метана и потери свежей струи воздуха в очистной выработке, $K_1$   |   | 1.2                                  |

Для представленных в таблице исходных данных при газоносности пласта  $12 \text{ м}^3/\text{т}$  рассчитанная допустимая нагрузка на очистной забой по газовому фактору составляет  $3650 \text{ т/сут}$ .

На рис. 4 показана прогнозируемая зависимость нагрузки при различных газоносностях угля и при неизменных значениях констант сорбции Ленгмюра. Предполагается, что при заблаговременном понижении газоносности угольного пласта с  $16$  до  $8 \text{ м}^3/\text{т}$  допустимая нагрузка на забой возрастет почти на порядок и достигнет  $10$  тыс.  $\text{т/сут}$ . Такие нагрузки характерны для эксплуатации очистных механизированных комплексов мирового уровня, что подтверждает важность использования эффективных технологий дегазации угольных пластов.

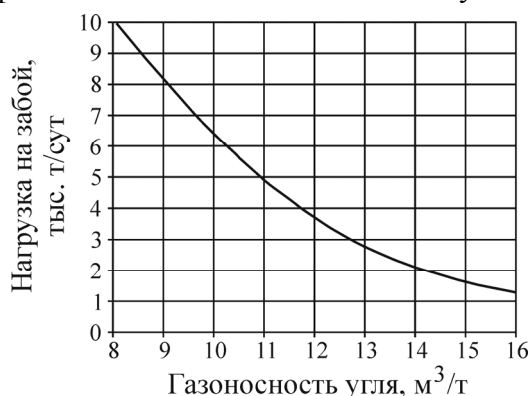


Рис. 4. Допустимая нагрузка на очистной забой в зависимости от газоносности угольного пласта

## ВЫВОДЫ

Большим преимуществом разработанной методики является то, что она требует знания ограниченного количества исходных данных: сорбционных и фильтрационных свойств угля, вмещающих пород и газоносности угольного пласта. В отличие от действующей методики расчета, данная методика не требует использования многочисленных эмпирических коэффициентов, достоверность которых мало обоснована и относится к низким нагрузкам на очистной забой 70-х годов прошлого века.

Разработанная методика учитывает исходные производственные данные работы очистного забоя на конкретной угольной шахте, содержащиеся в проектно-технической документации; физические свойства угольного пласта, основные законы массопереноса метана, поэтому обеспечивает достоверный прогноз важного производственного показателя — предельно допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания действующих угольных шахт. — М.: Недра, 1975.
2. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. — Макеевка; Донбасс: МакНИИ, 1989.
3. Трубецкой К. Н., Рубан А. Д., Забурдяев В. С. Особенности метановыделения в высокопроизводительных угольных шахтах // ФТПРПИ. — 2011. — № 4.
4. Полубаринова-Кочина П. Я. О неустановившейся фильтрации газа в угольном пласте // Прикл. математика и механика. — 1953. — Т. 17. — № 6.
5. Каркашадзе Г. Г., Иванов Ю. М., Ермак Г. П. Определение концентрации метана в выработанном пространстве по результатам съемки параметров вентиляционного потока вдоль лавы // ГИАБ. — 2012. — № 4.