

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД,
РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА
GEOMECHANICS, DESTRUCTION OF ROCKS BY EXPLOSION,
MINE AEROGASDYNAMICS AND MINING THERMOPHYSICS

Научная статья

УДК 622.2

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-75-83

РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ЗОНЫ ОТЖИМА В
УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ С УЧЕТОМ ИХ ГАЗОНОСНОСТИ

Стариков Геннадий Петрович¹, Мельник Татьяна Николаевна²,
Старикова Ирина Геннадьевна^{1,3*}, Подрухин Александр Александрович¹

¹Институт физики горных процессов

²Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина

³Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России

* для корреспонденции: ir-starik@yandex.ru

Аннотация.

В ходе проведения горных работ в призабойной зоне происходят интенсивные процессы перераспределения механических напряжений, газовыделения, деформации и разрушения. Число аварийных ситуаций, связанных с выбросами и вывалами породы, превышает число тех, что инициированы обрушением основной кровли. Для прогнозирования вывалов и иных опасных ситуаций проведен теоретический анализ зависимости глубины зоны отжима от механических, газодинамических и прочностных характеристик угольного пласта и вмещающих пород с использованием адаптированных моделей напряженного состояния пород, окружающих выработку.

Выполнен численный расчет глубины зоны отжима (зоны разгрузки и расстояния от забоя до точки максимума опорного давления) для условий отработки пласта h_6' – «Смоляниновский» шахты им. А. А. Скочинского. Проведен анализ взаимосвязи между параметрами зоны отжима и режимом газовыделения в выработке. Получена зависимость начальной скорости газовыделения из пробуренного шпура от величины давления в зоне отжима и времени, прошедшем с момента проведения работ. Даны теоретическая оценка времени, безопасного проведения следующего этапа выемки пласта, а именно когда газовыделение будет находиться на безопасном уровне. Результаты расчета подтверждены реальными параметрами режима проведения горных работ в пласте.

Изменение режима газовыделения в ту или иную сторону может быть свидетельством нарушения равновесия и стабильности окружающих пород, и мониторинг газовыделения на практике предоставляет важную информацию о безопасности выработки. Интенсивность газовыделения вследствие процессов, проходящих в опорной зоне, является косвенным критерием оценки прочностных свойств массива и его структуры.



Информация о статье

Поступила:

18 июня 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 ноября 2025 г.

Принята к публикации:

02 декабря 2025 г.

Опубликована:

22 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

зона отжима, опорное
давление, газовыделение,
вывал, выбросоопасность

Для цитирования: Стариков Г.П., Мельник Т.Н., Старикова И.Г., Подрухин А.А. Расчет и экспериментальная оценка глубины зоны отжима в угольных пластах с учетом их газоносности // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 6 (172). С. 75-83. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-75-83, EDN: AOHCGZ

Введение

Изучение и прогнозирование физико-механического и газодинамического состояния призабойной зоны угольного пласта представляется задачей, крайне важной с научной и практической точки зрения [1-5]. В ходе проведения горных работ в этой зоне происходят интенсивные процессы перераспределения механических напряжений, газовыделения, деформации и разрушения, а вышележащие породы, которые находились изначально в условиях объемного напряженного состояния, теряют опору, и равновесие, присутствовавшее в нетронутом массиве, нарушается [6-8].

В стремлении возобновить состояние равновесия пластины и вмещающие породы, окружающие выработку, деформируются. В результате выше и ниже выработки образуются зоны пониженных напряжений, а в глубине пласта формируются области опорного давления с повышенными механическими напряжениями. При этом в случае, когда эти напряжения превышают несущую способность угля, краевая часть пласта разрушается и максимум концентрации напряжений перемещается дальше вглубь, а уголь, разрушенный на кромке пласта, оказывается зажат боковыми породами и создает отпор. Поэтому достигается новое состояние равновесия, и область предельного равновесия, как правило, включает в себя и зону отжима. Под зоной отжима следует понимать ту часть пласта у обнажения, где деформации происходят на горизонтальном участке запредельных диаграмм.

Методика проведения исследования

С точки зрения теории упругости, поведение вмещающих пород и кровли над выработкой можно описать, используя известную модель изгиба пластинки с закрепленным краем под нагрузкой. В роли пластинки в данном случае выступает слой породы над выработкой. Условие равновесия (стабильности) кровли записывается как

$$P = D\Delta^2\xi \quad (1)$$

где P – давление, приложенное к пластинке, D – коэффициент жесткости породы, ξ – смещение пластинки. Коэффициент жесткости определяется упругими свойствами пластинки (породы):

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)} \quad (2)$$

где E – модуль Юнга, σ – напряжение, h – толщина пластинки (слоя породы, лежащего над выработкой). Давление P – горное давление, которое продолжает воздействовать на этот пласт и после выемки, т. е. когда пласт лишился опоры.

Из теории упругости известны и оценка силы, действующей на призабойную часть угольного пласта со стороны вышележащей породы, и условие отрыва (т. е. разрушения) этой породы, но в данном случае они мало применимы, поскольку с практической точки зрения более важными оказываются процессы нагружения и разрушения, в которые вовлечен сам угольный пласт. Большее число аварийных ситуаций связано с выбросами и вывалами породы, нежели с проседанием кровли. Поэтому имеет смысл использовать адаптированные модели напряженного состояния пород, окружающих выработку.

Согласно работе В. М. Гмошинского [9], опорное давление в призабойной зоне отрабатываемого пласта угля делится на 2 зоны – зону разрушения угля (σ_{yp}) и зону нормального напряжения в окрестности выработки (σ_y) (Рис. 1).

Давление в зоне разрушения угля (σ_{yp} , МПа) определяется по формуле [9]:

$$\sigma_{yp} = C \cdot e^{\frac{fx}{h-\xi}} \quad (3)$$

где C – сцепление угля, МПа; f – коэффициент трения ($f = \tan \varphi$),

φ – угол внутреннего трения, град; x – координата по пласту при расположении начала координат на кромке забоя, м; h – мощность пласта, м; ξ – коэффициент бокового давления:

$$\xi = \frac{v}{1-v} \quad (4)$$

v – коэффициент Пуассона.

Сцепление угля (C , МПа) рассчитывается как

$$C = \frac{0,9}{1+e^{(-7,28 \cdot (f_{cp}-0,75))}} \quad (5)$$

где f_{cp} – средневзвешенный коэффициент крепости угля по шкале М. М. Протодьяконова ($f_{cp} = 1,3$).

Нормальное напряжение в окрестности выработки (σ_y , МПа) определяется по формуле [9]:

$$\sigma_y = \gamma H \left(1 + k e^{-\frac{x}{\lambda}} \right) \quad (6)$$

где γ – объемный вес вмещающих пород, МПа/м ($\gamma = 0,025 \text{ МН}/\text{м}^3 = 0,025 \text{ МПа}/\text{м}$);

H – глубина от поверхности, м; λ – половина длины выработки, м; k – коэффициент концентрации напряжений по оси пласта (для условий, при которых $\lambda = 10$ м и $h \approx 2$ м, значение $k = 1,23$ [9]).

Результирующая формула, определяющая изменение горного давления со временем в неподвижном забое, имеет вид

$$\sigma_{yt} = C \cdot \exp \left(\frac{fx}{h\xi} \right) + \left[\gamma H \left(1 + k \cdot \exp \left(-\frac{x}{\lambda} \right) \right) - C \cdot \exp \left(\frac{fx}{h\xi} \right) \right] \exp \left(\frac{-t}{T} \right) \quad (7)$$

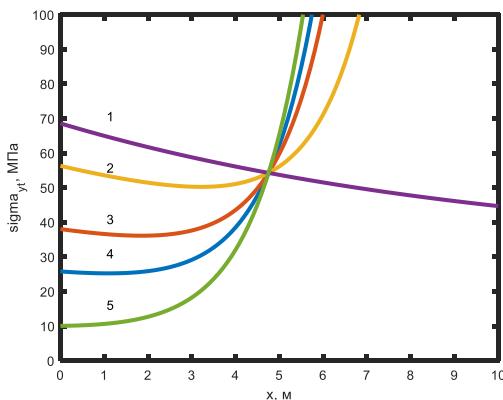


Рис. 1. Зависимости горного давления от времени с момента разгрузки пласта согласно (7): 1 – $t = 0$, 2 – $t = 1$ ч, 3 – $t = 3$ ч, 4 – $t = 5$ ч, 5 – $t = 10$ ч

Fig. 1. Time dependence of rock pressure after unloading of the formation according to (7): 1 – $t = 0$, 2 – 1 ч, 3 – 3 ч, 4 – 5 ч, 5 – 10 ч

Таблица 1. Давление в зоне разрушения угля и нормальное напряжение в окрестности выработки (пласт h_6 – «Смоляниновский»)
Table 1. Pressure in the coal destruction zone and normal stress in the vicinity of the workings (seam h_6 – “Smolyaninovsky”)

$x, \text{м}$	$\sigma_{yp}, \text{МПа}$	$\sigma_y, \text{МПа}$
0	0,88	–
1	2,10	–
2	5,00	–
3	11,91	–
4	28,33	–
4,095	30,75	55,86
4,74965	54,27	54,27
5	67,42	53,68
10	–	44,66
20	–	35,86
30	–	32,63
40	–	31,44
50	–	31,00
60	–	30,84
70	–	30,78
80	–	30,76
90	–	30,75
100	–	30,75

где t – время с момента вскрытия пласта, ч; T – время релаксации напряжений при разрушении угля (согласно [9], $T = 5$ ч).

Эта формула воспроизводит весь спектр кривых зависимости горного давления от времени с момента обнажения пласта до времени полной стабилизации напряжений (Рис. 1).

Как видно на Рис. 1, ключевой точкой, характеризующей распределение нагрузки в пласте, является точка пересечения всех кривых,

соответствующая уровню максимального давления на расстоянии от груди забоя 4,8 м и при давлении 56,2 МПа. Согласно рисунку, формула (7) не описывает адекватно поведение давления за этой точкой. Если эволюция давления до точки максимума соответствует экспериментальным данным, то экспоненциальный рост за ней – нет. Разумно в этом случае полагать, что за характерной точкой пересечения экспонент давление следует кривой (1), т. е. повторяет уровень давления в невозмущенном пласте. Сама же эта точка отображает собой максимум опорного давления [10].

Для определения глубины зоны разгрузки и расстояния от забоя до точки максимума опорного давления были выполнены аналитические расчеты для условий отработки пласта h_6 – «Смоляниновский» шахты им. А. А. Скочинского (при отработке которого было зафиксировано 158 выбросов с интенсивностью 475 т) со следующими параметрами: глубина отработки пласта $H = 1230$ м; прочность угля на сжатие $\sigma_{cж} = 10$ МПа; прочность угля на растяжение $\sigma_p = 0,5$ МПа; коэффициент Пуассона для угля $\mu = 0,3$; мощность отрабатываемого угольного пласта $h = 1,55$ м; половина длины выработки $\lambda = 10$ м; коэффициент концентрации напряжений по оси пласта $k = 1,23$; угол внутреннего трения угля $\varphi = 30^\circ$. Результаты выполненных расчетов приведены в Таблице 1.

Значение горного давления (P_0 , МПа) на глубине отработки пласта h_6 составляет:

$$P_0 = \gamma H = 30,75 \text{ МПа} \quad (8)$$

Коэффициент бокового давления с учетом вышеперечисленных параметров пласта равен $\xi = 0,43$. Коэффициент трения $f = 0,5774$ и сцепление угля $C = 0,8839$ МПа.

Согласно выполненным расчетам, глубина зоны разгрузки – расстояние x по пласту от кромки забоя до точки, в которой величина давления в зоне разрушения угля равна величине горного давления в нетронутом массиве ($\sigma_{yp} = \gamma H = 30,75$ МПа) составляет: $a_{разр} \approx 4,1$ м. При этом расстояние x по пласту от кромки забоя до точки максимума опорного давления, при котором величина давления в зоне разрушения угля равна величине нормального напряжения в окрестности выработки ($\sigma_{yp} = \sigma_y = 54,27$ МПа), составляет: $a_{max} \approx 4,75$ м (см. табл. 1).

Графики давления в зоне разрушения угля и нормального напряжения в окрестности выработки (пласт h_6 – «Смоляниновский») представлены на Рис. 2.

Согласно работе [11], расстояние от забоя до точки максимума опорного давления (a_{max} , м) определяется также расчетным путем по формуле:

$$a_{max} = 0,96 \cdot e \cdot \left(\frac{h}{1,3 \cdot \sigma_{cж}} \cdot K_f \right)^{\frac{2}{3}} \cdot f(P) \quad (9)$$

где e – множитель, учитывающий соотношение расстояния от разрезной печи до забоя (X_0 , м) к длине лавы (l , м) (согласно работе [11], для условий $X_0 = 100$ м и $l = 200$ м значение $e = 0,93$); $\sigma_{cж}$ – предел прочности угля на одноосное сжатие, МПа ($\sigma_{cж} = 10$ МПа); K_I – коэффициент интенсивности напряжений, соответствующий геометрии выработки, МПа/м²:

$$K_I = 0,8\gamma H\sqrt{\pi}\lambda \quad (10)$$

$f(P)$ – нормирующая функция:

$$f(P) = \frac{1}{\sqrt[3]{4}} \cdot \left(\sqrt[3]{\sqrt{1+P} + 1} - \sqrt[3]{\sqrt{1+P} - 1} \right)^2 \quad (11)$$

$$P = 0,57 \cdot \frac{|-\sigma_{cж}|^3}{K_I^2} \cdot \frac{h}{1,3 \cdot \sigma_{cж}} \quad (12)$$

Согласно этим формулам, $a_{max} = 4,72$ м

Таким образом, расчеты расстояния от забоя до точки максимума опорного давления (a_{max} , м), выполненные по формулам (3)–(7) и (9)–(12) показывают весьма близкие результаты.

Расчет ширины разрушающей краевой части пласта – зоны отжима (a_{ot} , м) выполняется по формуле [12]:

$$a_{ot} = \frac{h}{N_1} \cdot \left| \ln \left(\frac{N_2 k_n \gamma H}{q + c \cot \varphi} \right) \right| \quad (13)$$

где N_1 и N_2 – выражения, зависящие только от угла внутреннего трения (согласно работе [12], при значении угла внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$ параметр $N_1 = 0,524$ и $N_2 = 0,171$); k_n – коэффициент пропорциональности ($k_n = 3,8$); q – реакция крепи, МПа ($q = 10$ МПа).

Для условий отработки пласта h_6' – «Смоляниновский» ширина зоны отжима (a_{ot} , м) составляет $a_{ot} = 1,63$ м.

Используя формулы (3)–(7), можно рассчитать значения величины давления в зоне разрушения угля (σ_{yp} , МПа) и величины нормального напряжения в окрестности выработки (σ_y , МПа) в зоне отжима ($x = 1,63$ м): $\sigma_{yp} = 3,63$ МПа; $\sigma_y = 62,88$ МПа.

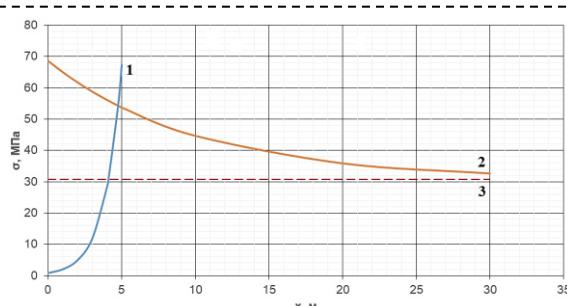


Рис. 2. Графики опорного давления для условий отработки пласта h_6' – «Смоляниновский»: 1 – давление в зоне разрушения угля (σ_{yp} , МПа); 2 – нормальное напряжение в окрестности выработки (σ_y , МПа); 3 – горное давление (P_0 , МПа).

Fig. 2. Support pressure graphs for the mining conditions of the h_6' seam – “Smolyaninovsky”: 1 – pressure in the coal destruction zone (σ_{yp} , MPa); 2 – normal stress in the vicinity of the workings (σ_y , MPa); 3 – rock pressure (P_0 , MPa)

Обсуждение результатов

В работе [13] приведена оценочная формула давления метана в порах угля в зависимости от величины горного давления:

$$\frac{P_{пл}(x)-P_{пл0}}{P_{пл0}} = \frac{3}{4G} \cdot (P_{(x)} - P_0) \quad (14)$$

где $P_{пл(x)}$ – давление метана в порах на расстоянии x м от кромки забоя по пласту, МПа; $P_{пл0}$ – давление метана в порах вне зоны влияния выработки, МПа;

$$P_{пл0} = Q \cdot P_a \cdot \rho \quad (15)$$

Q – метаноемкость угля, м³/т (для условий пласта h_6' значение $Q = 30$ м³/т);

P_a – атмосферное давление, МПа ($P_a = 10^5$ Па = 0,1 МПа);

ρ – плотность угля, т/м³ (для условий пласта h_6' значение $\rho = 1,32$ т/м³);

$$P_{пл0} = 30 \cdot 0,1 \cdot 1,32 = 3,96 \text{ МПа}$$

$P_{(x)}$ – горное давление на расстоянии x м от кромки забоя по пласту, МПа;

P_0 – горное давление вне зоны влияния выработки, МПа ($P_0 = \gamma H = 30,75$ МПа);

G – модуль сдвига, МПа;

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (14)$$

где E – модуль продольной упругости, МПа (для угля $E = 10^3$ МПа).

Определение параметров E и G необходимо рассчитывать согласно [14].

Соответственно, давление метана в порах на расстоянии x м от кромки забоя по пласту можно вычислить как

$$P_{пл}(x) = \frac{3P_{пл0}(P_{(x)}-P_0)}{4G} + P_{пл0} \quad (15)$$

В точке максимума опорного давления ($P_{пл(max)}$, МПа) при $x = 4,75$ м,

$P_{(x)} = \sigma_{yp} = \sigma_y = 54,27$ МПа для условий пласта h_6' – «Смоляниновский», давление газа составляет $P_{пл(max)} = 4,14$ МПа.

Согласно вышеприведенных соотношений, в зоне опорного давления формируется область с повышенным давлением газа в поровой системе. Однако данная ситуация не является стабильной, поскольку одновременно происходит выделение газа в пространство выработки по системе каналов и пор угольного вещества. Следует также учесть, что структура краевой части пласта отличается от структуры в зоне, неповрежденной при горных работах. Газовыделение в первые часы после проходки происходит из нескольких источников, и с учетом вентиляции трудно разделить выделение газа из измельченного угля и из стенок выработки. А именно вторая величина и является связанный с прочностными и структурными особенностями зоны отжима.

В установившемся режиме газовыделения поток газа через единицу площади обнаженной поверхности контролируется в первую очередь величиной давления в поровой системе. Внезапное изменение стационарного потока метана является самым быстрым откликом на

локальное изменение структуры породы или увеличение давления газа в ней.

В работе [15] была получена зависимость между пластовым давлением газа и начальной скоростью газовыделения из пробуренного шпура, которая имеет вид

$$q = 4\pi \frac{\alpha D L \gamma_{nop} P_m}{P_a} \quad (16)$$

где q – начальная скорость газовыделения, $\text{м}^3/\text{с}$, P_a – атмосферное давление, Па, α – параметр функции Бесселя ($\alpha = 0,15$), D – коэффициент диффузии метана в воздухе, $\text{м}^2/\text{с}$, γ_{nop} – открытая пористость угля ($\gamma_{nop} = 0,05$), L – длина скважины, м ($L = 0,5$ м).

Объединяя формулы (15) и (16), с учетом зависимости напряжения от глубины в зоне отжима (7), можно получить зависимость газовыделения из любой точки пласта от времени. К примеру, при вышеуказанных параметрах и глубине шпура $L = 1$ м, начальная скорость газовыделения $q = 7,05 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с} = 4,23 \text{ л}/\text{мин}$.

Среди параметров газовыделения, определяемых непосредственно в выработке, начальная скорость газовыделения играет особую роль. Эта величина позволяет судить не только о количестве газа, аккумулированного угольным веществом, но и о структурных характеристиках пласта, а также о распределении давления вокруг выработки.

Определенную сложность представляет собой разграничение потока газа из разрушенной поровой системы непосредственно у обнаженной поверхности и потока, вызванного повышением давления в опорной зоне. Поскольку, как отмечалось выше, расстояние до максимума опорного давления составляет приблизительно 2–5 м (или 4,8, как в данном расчете), то время начала фильтрации газа из этой зоны $t \sim x^2/D_f$, $D_f \sim 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, равно 2 суткам. Этот факт позволяет отделить газовыделение из области максимума опорного давления от первичного увеличения концентрации метана при проведении горных работ.

Если обратиться к формуле (7) и учесть данные о глубине зоны отжима и положении максимума горного давления, можно сделать вывод, что при бурении шпура для измерения газовыделения затрагивается только приповерхностная зона стенки выработки. Нагрузку на пласт в этой зоне можно приближенно считать постоянной и равной нагрузке при $x=0$:

$$\sigma_{yt} = \gamma H \exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (17)$$

Таким образом, появляется возможность прогнозировать скорость начального газовыделения:

$$q = 4\pi \gamma H \frac{\alpha D L \gamma_{nop}}{P_a} \exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (18)$$

Измеряя текущую скорость газовыделения сразу после проведения горных работ, на основании (18) можно судить о времени, когда станет безопасным проведение следующего этапа выемки пласта, а именно когда газовыделение будет находиться на безопасном уровне. Согласно (18), уровень газовыделения, обеспечивающий безопасность от внезапных выбросов породы и газа (нагрузка на край пласта достаточно снизилась), достигается по истечении времени

$$t_{safe} = t_0 - T \ln\left(-\frac{q}{q_{safe}}\right) \quad (19)$$

с момента t_0 (измерение газовыделения). Например, если при измерении начальная скорость газовыделения составляла 5 л/мин, а безопасный уровень равен 2 л/мин, то интервал между этапами разработки должен составлять не менее 9 часов.

Увеличение интенсивности газовыделения можно трактовать как ускоренную фильтрацию метана по системе пор и трещин в нарушенной породе. Следует предположить, что в данном месте выработки порода потеряла прочность и представляет собой повышенную опасность в смысле возможного обрушения. С другой стороны, в зоне опорного давления газ создает противодавление, уменьшающее сдвиговую часть упругой энергии угольного каркаса. Уменьшение газовыделения (по сравнению со стационарным значением) может быть свидетельством того, что газ, аккумулированный в зоне отжима, покинул ее в результате ускоренной фильтрации по разрушенным трещинам и равновесие в этой зоне нарушено. Соответственно, имеется возможность внезапного выброса породы. Поэтому контроль газовыделения может быть средством локализации опасных мест и прогноза выбросов с учетом возможных изменений стабильности зоны отжима.

Выводы

Явления, происходящие в зоне отжима выработок, являются результатом воздействия целого ряда факторов, тесно связанных между собой. Одновременное существенное повышение механической нагрузки на породу в этой зоне, нарушение структуры краевой части пласта, локальное увеличение давления газа образуют комбинацию, опасную с точки зрения выбросов породы и газа. Поскольку при проведении горных работ нет возможности заранее знать о мелких особенностях пласта, повысить безопасность можно путем мониторинга газовыделения на всем протяжении выработки. Изменение режима газовыделения в ту или иную сторону может быть свидетельством нарушения равновесия и стабильности окружающих пород. Мониторинг газовыделения на практике зачастую включает в себя только реагирование на повышение концентрации метана в выработке

до взрывоопасного уровня. Однако важную информацию о стабильности и безопасности выработки может предоставить мониторинг изменений концентрации метана в безопасном диапазоне. Интенсивность газовыделения вследствие процессов, проходящих в опорной зоне, является косвенным критерием оценки прочностных свойств массива и его структуры.

В целом, при разработке проекта ведения очистных работ на выбросоопасном угольном пласте необходимо рассчитать следующие параметры:

- глубину зоны опорного давления;
- предельное напряжение в зоне опорного давления;
- давление метана в зоне отжима;
- начальную скорость газовыделения;
- безопасное время работы очистного забоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kochurov A. N. Моделирование периодов отжима угольного массива в очистной заходке // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 4. С. 15–20.
2. Xuelong Li, Xinyuan Zhang, Wenlong Shen, Qingdong Zeng, Peng Chen, Qizhi Qin and Zhen Li. Research on the Mechanism and Control Technology of Coal Wall Sloughing in the Ultra-Large Mining Height Working Face // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2023. V. 20. Pp. 868–885.
3. Jie Zhang, Jianjun Wu, Sen Yang, Wenyong Bai. Analysis and control of the mechanism of coal pillar sloughing in the shallow buried thick coal seam // Energy. Sci. Eng. 2022. V.10. Pp. 3692–3710.
4. Xiao-Xiang Wei, Qing-Long Yun, Jing Wu, Xiao-He Wang, Yin-Wei Wang. Study on the Full-Cycle Stress Evolution Law and Reasonable Size of Isolated Coal Pillar // Energy Science & Engineering. 2025. V. 13. Pp. 203–217.
5. Shinkevich M., Shevchenko L., Grishin V. Determination of the Parameters of Geomechanical Stress Undulation Along the Length of a Face // IVth International Innovative Mining Symposium, E3S Web of Conferences. 2019. V. 105. P. 01045.
6. Ройтер М., Крах М., Кисслинг У., Векслер Ю. О геомеханическом состоянии очистного забоя при отработке угольных пластов на шахте «Полысаевская» в Кузбассе // ФТПРПИ. № 1. 2017. С. 47–52.
7. Tianshou Ma, Jinhua Liu, Jianhong Fu, Bisheng Wu. Drilling and completion technologies of coalbed methane exploitation: an overview // International Journal of Coal Science & Technology. 2022. V. 9. Pp. 68–99.
8. Трофимов В. А. Внезапный выброс угля и газа. Вынос угля и газа в выработанное пространство // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. S1. С. 391–405.
9. Гмошинский В. Г. Горное давление на пологий угольный пласт в окрестности выработки // Уголь. 1957. № 6. С. 16–23.
10. Способ прогноза выбросоопасности подготовительных выработок / Патент Российской Федерации на изобретение RU 2 473 809 C1. Опубл. 27.01.2013, Бюл. №3. 7 с.
11. Расчет и экспериментальная оценка напряжений в целиках и краевых частях пласта угля (Методические указания) / МУП СССР. Ленинград : ВНИМИ, 1973. 129 с.
12. Головченко Е. А., Момот Д. И. Определение ширины разрушающейся краевой части угольного массива // Материалы X Международной конференции «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве». Тирасполь, 2017. С. 121–124.
13. Фельдман Э. П., Стариков Г. П., Калугина Н. А., Навка Е. А. Перераспределение метана в призабойной зоне угольного пласта // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2013. № 13 (ч. 1). С. 85–99.
14. Стариков Г. П. Мельник Т. Н., Нескреба Д. А., Шажко Я. В., Борисенко Э. В. Способ определения прочности угольного вещества. Патент Российской Федерации на изобретение №2790335, 16.02.2023 г.
15. Стариков Г. П., Мельник Т. Н., Старикова Н. Г., Шажко Я. В. Метод определения давления метана в угольном пласте // Физика и техника высоких давлений. 2022. № 2. С. 116–120.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Стариков Геннадий Петрович доктор технических наук, профессор, научный руководитель Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт физики горных процессов» 283048, Донецк, Донецкая Народная Республика, ул. Р. Люксембург, 72 e-mail: ir-starik@yandex.ru.

Мельник Татьяна Николаевна кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина» 283048, Донецк, Донецкая Народная Республика, ул. Р. Люксембург, 72, e-mail: tatmeln18@gmail.com.

Старикова Ирина Геннадьевна кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт физики горных процессов» 283048, Донецк, Донецкая Народная Республика, ул. Р. Люксембург, 72, заместитель начальника Федерального государственного казенного учреждения «Научно-исследовательский институт «Респиратор» Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» e-mail: ir-starik@yandex.ru.

Подрухин Александр Александрович научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт физики горных процессов» 283048, Донецк, Донецкая Народная Республика, ул. Р. Люксембург, 72 e-mail: alex-1981p@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Стариков Геннадий Петрович – формулировка задачи исследования, выводы.

Мельник Татьяна Николаевна – написание текста.

Старикова Ирина Геннадьевна – сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы.

Подрухин Александр Александрович – обзор соответствующей литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

CALCULATION AND EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE DEPTH OF THE EXTRACTION ZONE IN COAL SEAMS TAKING INTO ACCOUNT THEIR GAS CONTENT

Gennady P. Starikov¹, Tatyana N. Melnik²,
Irina G. Starikova^{1,3,*}, Alexander A. Podrukhin¹

¹Institute of Physics of Mining Processes

²Donetsk Institute of Physics and Technology named after A.A. Galkin

³Research Institute "Respirator" of the Ministry of Emergency Situations of Russia

* for correspondence: ir-starik@yandex.ru

Abstract.

During mining operations, intensive processes of redistribution of mechanical stresses, gas release, deformation and destruction occur in the bearing pressure zone. The number of emergencies related to emissions and rock falls exceeds the number of those initiated by roof subsidence.

To predict inrushes and other dangerous situations, a theoretical analysis of the dependence of the depth of the extraction zone on the mechanical, gas-dynamic and strength characteristics of the coal seam and the host rocks was carried out using adapted models of the stress state of the rocks surrounding the mine. A numerical calculation of the depth of the pressing zone (the unloading zone and the distance from the bottom to the maximum bearing pressure point) has been performed for the working conditions of the h6' – Smolyaninovsky bed of the A.A. Skochinsky mine. The analysis of the relationship between the parameters of the bearing pressure zone and the gas emission mode in the face is carried out. The dependence of the initial rate of gas release from the drilled hole on the pressure in the extraction zone and the time elapsed since the work was carried out is obtained. A theoretical estimate of the time when it will be safe to carry out the next stage of excavation is given, namely, when the gas release will be at a safe level. The calculation results are confirmed by the actual parameters of the mining regime in the formation.

A change in the gas emission mode in one direction or another may be an evidence of a violation of the equilibrium and stability of the surrounding rocks, and monitoring of gas emissions in practice provides important information about the safety of excavation. The intensity of gas emission due



Article info

Received:

18 June 2025

Accepted for publication:

15 November 2025

Accepted:

02 December 2025

Published:

22 December 2025

Keywords: rock-fracture zone, bearing pressure, gas release, inrush, outburst hazard.

to the processes taking place in the support zone is an indirect criterion for assessing the strength properties of the massif and its structure.

For citation: Starikov G.P., Melnik T.N., Starikova I.G., Podrukhin A.A. Calculation and experimental assessment of the depth of the extraction zone in coal seams taking into account their gas content. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 6(172):75-83. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-75-83, EDN: AOHCZG

REFERENCES

1. Kochurov A.N. Modelirovanie periodov otzhima ugol'nogo massiva v ochistnoj zahodke [Modeling of the sloughing periods in a coal bed in the course of excavation]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' [Mining information and analytics bulletin]. 2018; 4:15–20.
2. Xuelong Li, Xinyuan Zhang, Wenlong Shen, Qingdong Zeng, Peng Chen, Qizhi Qin and Zhen Li. Research on the Mechanism and Control Technology of Coal Wall Sloughing in the Ultra-Large Mining Height Working Face. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2023; 20:868-885.
3. Jie Zhang, Jianjun Wu, Sen Yang, Wenyong Bai. Analysis and control of the mechanism of coal pillar sloughing in the shallow buried thick coal seam. *Energy. Sci. Eng.* 2022; 10:3692–3710.
4. Xiao-Xiang Wei, Qing-Long Yun, Jing Wu, Xiao-He Wang, Yin-Wei Wang. Study on the Full-Cycle Stress Evolution Law and Reasonable Size of Isolated Coal Pillar. *Energy Science & Engineering.* 2025; 13:203–217.
5. Shinkevich M., Shevchenko L., Grishin V. Determination of the Parameters of Geomechanical Stress Undulation Along the Length of a Face. *IVth International Innovative Mining Symposium, E3S Web of Conferences.* 2019; 105:01045.
6. Rojter M., Krah M., Kissling U., Veksler Yu. O geomekhanicheskem sostoyanii ochistnogo zaboya pri otrabotke ugol'nyh plastov na shahte "Polysaevskaya" v Kuzbasse [On geomechanical state of a breaking face in the course of excavation of coal beds of Polysaevskaya mine]. *FTPPI [Physical and Technical problems of mining].* 2017; 1:47–52.
7. Tianshou Ma, Jinhua Liu, Jianhong Fu, Bisheng Wu. Drilling and completion technologies of coalbed methane exploitation: an overview. *International Journal of Coal Science & Technology.* 2022. V. 9. P. 68–99.
8. Trofimov V.A. Vnezapnyj vybros uglya i gaza. Vynos uglya i gaza v vyrabotannoe prostranstvo [Sudden outburst of coal and gas. Release of coal and gas to excavation space]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' [Mining information and analytics bulletin]. 2011; S1:391–405.
9. Gmoshinskij V.G. Gornoe davlenie na pologij ugol'nyj plast v okrestnosti vyrabotki [Rock pressure on a shallow coal bed in the vicinity of operation place]. *Ugol' [Coal].* 1957; 6:16–23.
10. Sposob prognoza vybrosoopasnosti podgotovitel'nyh vyrabotok [Method of the forecast of outburst hazard of preparatory faces]. Patent Rossijskoj Federacii na izobretenie [Patent of RF]. RU 2 473 809 C1 – Publ. 27.01.2013, Bul. 3.
11. Raschet i eksperimental'naya ocenka napryazhenij v celikah i kraevyh chastyah plasta uglya (Metodicheskie ukazaniya) [Calculation and experimental estimation of stresses in the bulk and at the edge of a coal bed. Methodological guidelines]. MUP SSSR [Ministry of coal industry]. Leningrad: VNIMI, 1973.
12. Golovchenko E.A., Momot D.I. Opredelenie shiriny razrushaemoj kraevoj chasti ugol'nogo massiva [Estimation of the width of the fractured edge part of coal massif]. Materialy X Mezhdunarodnoj konferencii «Matematicheskoe modelirovanie v obrazovanii, nauke i proizvodstve» [X Int. conf."Math. modeling in education, science and industry"]. Tiraspol'. 2017; 121–124.
13. Fel'dman E.P., Starikov G.P., Kalugina N.A., Navka E.A. Pereraspredelenie metana v prizabojnoj zone ugol'nogo plasta [Methane redistribution in the face zone of a coal bed]. Naukovi praci UkrNDMI NAN Ukrainskoi Akademii Nauk [Sci. works of UkrNDMI NAS of Ukraine]. 2013; 13:85–99.
14. Starikov G.P., Mel'nik T.N., Starikova N.G., Shazhko Ya.V. Metod opredeleniya davleniya metana v ugol'nom plaste [Method for estimation of methane pressure in a coal bed]. Fizika i tekhnika vysokih davlenij [High Pressure physics and technics]. 2022; 2:116–120.
15. Starikov G.P. Mel'nik T.N., Neskreba D.A., Shazhko Ya.V., Borisenko E.V. Sposob opredeleniya prochnosti ugol'nogo veshchestva [Method for estimation of the strength of coal substance]. Patent Rossijskoj Federacii na izobretenie [Patent of RF]. №2790335, 16.02.2023.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Gennady P. Starikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Physics of Mining Processes, 72 R. Luxemburg Str., Donetsk, 283048, Donetsk People's Republic e-mail: ir-starik@yandex.ru

Tatiana N. Melnik, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Federal State Budgetary Scientific Institution "Donetsk Galkin Institute of Physics and Technology", 72 R. Luxemburg str., Donetsk, 283048, Donetsk People's Republic, e-mail: tatmeln18@gmail.com

Irina G. Starikova, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Physics of Mining Processes, 72 R. Luxemburg Str., Donetsk, 283048, Donetsk People's Republic, Deputy Head of the Federal State-Funded Institution Scientific Research Institute Respirator of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and elimination of consequences of natural disasters" e-mail: ir-starik@yandex.ru

Alexander A. Podrukhan, Researcher at the Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Physics of Mining Processes, 72 R. Luxemburg Str., Donetsk, 283048, Donetsk People's Republic, e-mail: alex-1981p@mail.ru

Contribution of the authors:

Gennady P. Starikov – formulation of the research task, conclusions.

Tatiana N. Melnik – writing the text.

Irina G. Starikova – data collection and analysis, review of relevant literature.

Alexander A. Podrukhan – review of relevant literature.

All authors have read and approved the final manuscript.

