

Параметры дегазации выбросоопасных пластов с использованием гидроразрыва

Н. Ю. Трошков✉

Кемеровский филиал АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела.
Межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Кемерово, Российская Федерация

✉ troshkoff1973@mail.ru

Резюме. Определены параметры дегазации выбросоопасных пластов с использованием гидроразрыва. Предложено расстояние между пластовыми дегазационными скважинами находить исходя из условия снижения газоносности до безопасных по выбросам пределов и с учетом фильтрационных свойств угля. Приведены зависимости, позволяющие расчетным путем определять коэффициенты газопроницаемости на основании природных факторов для нахождения суммарного количества выделившегося метана в дегазационную скважину. Изложены результаты исследований по выявлению связи между давлением нагнетаемой жидкости, свойствами угля и условиями залегания пласта. Установлено, что давление жидкости, нагнетаемой в пласт, зависит от физических свойств угля, глубины и угла падения пласта, а не только от глубины залегания. Указывается, что приближенно физические свойства пласта могут быть учтены осредненным значением коэффициента Пуассона и выходом летучих веществ.

Ключевые слова: дегазация, выбросоопасный пласт, гидроразрыв, дегазационная скважина, газоносность, газопроницаемость, метан, физические свойства угля

Для цитирования: Трошков Н.Ю. Параметры дегазации выбросоопасных пластов с использованием гидроразрыва. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 45-49. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-45-49>.

Parameters for degassing outburst-prone seams using hydraulic fracturing

N. Yu. Troshkov ✉

Kemerovo Branch of JSC «Research institute of rock mechanics and mine survey – Inter-branch research center
«VNIMI», Kemerovo, Russian Federation

✉ troshkoff1973@mail.ru

Abstract. Parameters for degassing outburst-prone seams using hydraulic fracturing are determined. It is proposed that the distance between seam drainage boreholes be determined based on the condition of reducing gas content to safe emission limits and taking into account the filtration properties of the coal. Dependencies are provided for calculating gas permeability coefficients depending on natural factors to determine the total amount of methane released into the drainage borehole. The results of studies on the relationship between injected fluid pressure, coal properties, and seam bedding conditions are presented. It has been established that the pressure of fluid injected into a seam depends on the physical properties of the coal, the depth, and the dip angle of the seam, and not just the burial depth. It is noted that the physical properties of the seam can be approximately accounted for by the average value of Poisson's ratio and the yield of volatile substances.

Keywords: degassing, outburst-prone seam, hydraulic fracturing, degassing well, gas content, gas permeability, methane, physical properties of coal

For citation: Troshkov N.Yu. Parameters for degassing outburst-prone seams using hydraulic fracturing. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 45-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-45-49>.

Введение

Одним из основных способов региональной профилактической обработки выбросоопасных угольных пластов в Кузнецком бассейне является предварительная дегазация угольного массива пластовыми скважинами, пробуренными из горных выработок. В условиях значительного увеличения нагрузки на очистной забой и повышения темпов проведения подготовительных выработок требуемая эффективность дегазации угольных пластов должна составлять 70–80 % [1–4].

Высокая эффективность дегазации необходима также для предотвращения внезапных выбросов угля и газа в очистных и подготовительных выработках. При низкой природной газопроницаемости угольного пласта и снижении ее с увеличением глубины горных работ необходимо уменьшать расстояние между дегазационными скважинами или увеличивать срок дегазации, что является нецелесообразным по технико-экономическим показателям. Поэтому все более широкое применение находят искусственные методы интенсификации газовыделения в пластовые скважины.

Эффективным методом интенсификации газовыделения является гидравлический разрыв пласта из подземных выработок с последующей дегазацией угольного массива пластовыми скважинами, пробуренными в зоне гидроразрыва [5, 6]. Эффективность дегазации разрабатываемых пластов с предварительным гидроразрывом составляет 50–60 %, что свидетельствует о значительном снижении газоносности угля и, следовательно, выбросоопасности пласта [7, 8].

Проведенными на выбросоопасных пластах исследованиями установлено, что средняя интенсивность газоотдачи дегазационных скважин, пробуренных в зоне гидроразрыва, в 2–3 раза выше, чем газоотдача скважин, расположенных вне зоны гидроразрыва. Интенсификация процесса дегазации склонных к внезапным выбросам угольных пластов рекомендуется при газопроницаемости менее 0,01 мД и при невыдержанной гипсометрии пласта, а также с целью сокращения сроков дегазации и улучшения безопасных условий на пластах с более высокой газопроницаемостью. Пластовые дегазационные скважины бурятся после осуществления гидроразрыва угольного пласта. Их длина должна приниматься с таким расчетом, чтобы будущие подготовительные выработки соседнего столба или нижележащего подэтажа находились в зоне предварительной дегазации. Расстояние между пластовыми дегазационными скважинами находится исходя из условия снижения газоносности угля до безопасных по выбросам пределов.

Цель исследований: определить расчетные параметры давлений, наблюдаемых при различных режимах и схемах нагнетания воды в пласт при гидроразрыве на подготовительных и выемочных участках угольных шахт Кузбасса, отработывающих угольные пласты опасные по выбросам.

Методы и результаты исследований

Согласно руководству по дегазации угольных шахт [9], расстояние между параллельно-одиночными скважинами в блоке определяется по формуле

$$R_i = \frac{k_b z l_c q_0 b t}{H m \gamma q_{пл} k_{дег,пл}}, \quad (1)$$

где k_b – коэффициент влияния разрежения для условий Кузнецкого бассейна, принимается по данным [9];

z – коэффициент, характеризующий неравномерность газовыделения из пласта в отдельные скважины, $z = 0.75$;

l_c – полезная длина скважины, м;

q_0 – значение начального удельного метановыделения, м³/м сут;

b – коэффициент, учитывающий изменение метановыделения из скважин во времени;

t – продолжительность дренирования пласта скважинами, сут;

H – высота этажа (подэтажа), дегазируемая скважинами, м;

γ – объемный вес угля, т/м³;

m – мощность пласта, м;

$q_{пл}$ – метанообильность, обусловленная метановыделением из разрабатываемого пласта, м³/т;

$k_{дег,пл}$ – требуемый коэффициент эффективности дегазации пласта.

Числитель формулы (1) представляет собой объем извлеченного газа за время t . Требуемая степень дегазации пласта с точки зрения предотвращения выбросов угля и газа определяется отношением объема газа, который необходимо извлечь за определенный период, ко всему объему содержащегося газа на данном участке:

$$K_d^B = \frac{k_b z l_c q_0 b t}{L m \gamma R_b x}, \quad (2)$$

где K_d^B – степень дегазации выбросоопасного пласта;

L – ширина участка, околнуренного выработками (высота этажа, подэтажа, ширина столба), м;

R_b – расстояние между дегазационными скважинами, пробуренными по выбросоопасному пласту, м;

x – природная газоносность угля, м³/т.

Из уравнения (2) расстояние между пластовыми скважинами на выбросоопасных пластах определяется следующим выражением

$$R_b = \frac{k_b z l_c q_0 b t}{L m \gamma x q_0} \text{ м.} \quad (3)$$

Необходимая степень дегазации угольного массива, исключаяющая внезапные выбросы угля и газа, находится по формуле [10]

$$K_d^B = \frac{x - x_\sigma}{x}, \quad (4)$$

где x_σ – безопасное значение газоносности угля, м³/т, зависит от прочностных и газодинамических свойств угля

$$x_\sigma = \frac{cA}{1 + b_r A} - \frac{100 - A^C}{100} \frac{M^3}{T}, \quad (5)$$

здесь c , b_r – коэффициенты уравнения, характеризующие рост природной газоносности шахтопласта с глубиной; значения их устанавливаются по результатам газового опробования в процессе геологоразведочных работ, м²/т, м⁻¹;

A – коэффициент, учитывающий влияние коэффициента крепости f и начальной скорости газоотдачи угля ΔP на величину x_σ [10];

A^C – зольность угля, %.

С учетом формулы расстояние между дегазационными скважинами, пробуренными по выбросоопасному пласту, рассчитывается по выражению

$$R_B = \frac{k_{Bz} q_0 b t}{L m \gamma (x - x_0)} \text{ м.} \quad (6)$$

Расстояние между пластовыми скважинами, пробуренными в зоне гидроразрыва, определяется по формуле

$$R_{B.Г} = \frac{k_{Bz} q_0 b t k_{и}}{L m \gamma (x - x_0)}, \quad (7)$$

где $k_{и}$ – коэффициент, учитывающий интенсификацию метановыделения из пластовых скважин, пробуренных в зоне гидроразрыва.

В уравнениях (6) и (7) произведение $q_0 b t$ представляет суммарное метановыделение в скважину за период t , то есть

$$q_0 b t = Q_t \frac{\text{м}^3}{\text{м}}. \quad (8)$$

Известно [11], что удельное метановыделение из дегазационных скважин q_t на данный период определяется уравнением

$$q_t = q_0 e^{-\beta t} \frac{\text{м}^3}{\text{м} \cdot \text{сут.}}, \quad (9)$$

где e – основание натуральных логарифмов;

β – коэффициент, характеризующий темп снижения газоразделения в скважины, сут.

Темп снижения газоразделения в одиночные скважины зависит от фильтрационных свойств угольного массива.

Нами определена эта зависимость для условий Кузнецкого бассейна:

$$\beta = 1,3 \cdot 10^{-5} (\lg K + 9,8), \quad (10)$$

где K – коэффициент газопоницаемости, мД.

Коэффициент газопоницаемости угля на дегазируемом участке угольного пласта находится в зависимости от глубины залегания пласта, газового давления, влажности и вещественно-петрографического состава угля [12].

Влажность ω и вещественно-петрографический состав угля на одном шахтопласте могут колебаться в значительных пределах. Поэтому для более точного расчета коэффициента газопоницаемости необходимо учитывать влажность и вещественно-петрографический состав угля исследуемого участка угольного пласта.

С учетом влажности коэффициент газопоницаемости рассчитывается по формуле

$$K = \bar{K} \frac{d' + c v t^2}{d} \text{ мД}, \quad (11)$$

С учетом вещественно-петрографического состава угля, то есть процентного содержания витринита, в угле коэффициент газопоницаемости определяется по формуле

$$K = \bar{K} \frac{d' + c v t^2}{d} \text{ мД}, \quad (12)$$

где $\bar{K}$ – среднее значение коэффициента газопоницаемости, мД;

A, B, C, d', c, d – коэффициенты, зависящие от структурных особенностей углей.

Исходя из уравнений (11) и (12), средние значения коэффициентов газопоницаемости определяются по формуле

$$K = \bar{K} \frac{(d' + c v t^2)(A - B \omega)}{(A + \omega) E} \text{ мД}, \quad (13)$$

где E – эмпирический коэффициент, представляющий собой произведение коэффициентов d и C из уравнений (11) и (12).

Подставляя значения коэффициентов газопоницаемости в формулу (10), находим коэффициенты, характеризующие темп снижения газоразделения в дегазационные скважины во времени.

Проинтегрировав выражение (9), получим суммарное количество выделившегося метана в скважину за время

$$Q_t = \frac{q_0 \left[1 - e^{-1,3 \cdot 10^{-5} (\lg K + 9,8) t} \right]}{1,3 \cdot 10^{-5} (\lg K + 9,8)} \frac{\text{м}^3}{\text{м}}. \quad (14)$$

Таким образом, расстояние между дегазационными скважинами, пробуренными в зоне гидроразрыва на выбросоопасных пластах, в зависимости от природной газоносности угля, безопасного по выбросам значения газоносности, продолжительности дегазации и фильтрационных свойств угольного пласта может быть определено по уравнению

$$R_{B.Г} = \frac{k_{Bz} Q_t k_{и}}{L m \gamma (x - x_0)} \text{ м.} \quad (15)$$

Коэффициент газопоницаемости угольных пластов, склонных к внезапным выбросам угля и газа, для определения суммарного количества выделившегося метана в скважину рассчитывается по формуле (13).

При гидроразрыве пласта возникает необходимость интерпретации многочисленных исследований и результатов многолетнего опыта предварительного увлажнения угольных пластов применительно к новым режимам нагнетания воды в пласты. При этом установлено, что фильтрация воды в угольных пластах происходит по системе редко расположенных, примерно перпендикулярных плоскости пласта (вертикальных) трещин и по послойным (горизонтальным) трещинам. Указанные трещины можно назвать гидропроводными.

При нагнетании воды в пласт через шпур, пробуренный из очистного забоя, пересечение шпура с гидропроводной трещиной маловероятно. Причем в случае их пересечения вода быстро проникает в забой, и шпур бракуется. Кроме того, в этом случае влиянием горного давления на параметры нагнетания можно пренебречь. Следовательно, давление нагнетания воды в пласт, особенно его максимальное значение, будет определяться давлением расчленения послойных трещин.

Математическая обработка замеров показала, что давление нагнетания с достаточной для практики точностью может быть определено из выражения

$$P_{ш} = 0,03 \cdot (0,27 - V^r)^2 + 6,0, \quad (16)$$

где $P_{ш}$ – давление расчленения послойных трещин, МПа;
 V^r – выход летучих веществ, %.

При нагнетании воды через длинные скважины, пробуриваемые в плоскости пласта, могут иметь место три случая: скважина пересекла «вертикальную» или «горизонтальную», не имеющую близлежащих мест спайности трещину, и сква-

жина не имеет пересечений с гидропроводными трещинами.

В первом случае давление нагнетания должно быть достаточным для раскрытия «вертикальной» трещины, сжатой горным давлением, величина которого с учетом осредненной величины коэффициента Пуассона определится из выражения

$$P_v = (25\sin\alpha + 11\cos\alpha) \cdot H \cdot 10^{-3}, \quad (17)$$

где P_v – давление раскрытия «вертикальной» трещины, МПа;
 α – угол падения пласта, град;
 H – глубина залегания пласта, м.

Во втором случае давление нагнетания должно раскрыть «горизонтальную» трещину, сжатую горным давлением, определяемым из выражения

$$P_r = (25\cos\alpha + 11\sin\alpha) \cdot H \cdot 10^{-3}, \quad (18)$$

где P_r – давление раскрытия «горизонтальной» трещины, МПа.

В третьем случае давление нагнетания должно быть равно наибольшему давлению, определенному по одной из вышеприведенных формул.

Следовательно, давление гидроразрыва (гидрорасчленения) в различные моменты нагнетания может принимать значения, определяемые формулами (16), (17), (18), а при больших скоростях нагнетания (более 1 л/с), когда требуется не только раскрытие, но расширение трещин, может достигать значений

$$P_{гр\max} = P_r + P_{ш}, \quad (19)$$

где $P_{гр\max}$ – наибольшее давление гидроразрыва, МПа.

Следует отметить, что скорость закачки воды в скважину, по данным работ [13–15], изменяется в пределах 6–70 л/с.

Приведенные выше формулы пригодны для ориентиро-

вочных расчетов давлений, наблюдаемых при различных режимах и схемах нагнетания воды в пласт.

Заключение

1. Проведенными на выбросоопасных пластах исследованиями установлено, что средняя интенсивность газоотдачи дегазационных скважин, пробуренных в зоне гидроразрыва, в 2–3 раза выше, чем газоотдача скважин, расположенных вне зоны гидроразрыва. Эффективность дегазации при этом достигает 50–60 %.

2. Интенсификация процесса дегазации склонных к внезапным выбросам угольных пластов рекомендуется при газопроницаемости менее 0,01 мД и при невыдержанной гипсометрии пласта, а также с целью сокращения сроков дегазации и улучшения безопасных условий на пластах с более высокой газопроницаемостью.

3. Расстояние между пластовыми дегазационными скважинами следует определять исходя из условия снижения газозонности до безопасных по выбросам пределов и с учетом фильтрационных свойств угля.

4. Давление гидроразрыва зависит от физических свойств угля (выхода летучих веществ, коэффициента Пуассона), глубины залегания и угла падения пласта.

5. Для нахождения общего количества выделившегося метана в дегазационную скважину получены зависимости, позволяющие определять коэффициенты газопроницаемости в зависимости от природных факторов.

6. Полученные расчетные зависимости позволяют определять давление при различных режимах и схемах нагнетания воды в пласт при его гидроразрыве.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований, направленных на определение расчетных параметров дегазации и гидроразрыва на выбросоопасных угольных пластах Кузбасса.

2. Результаты исследований могут быть использованы для проектирования вентиляции и дегазации на выемочных и подготовительных участках шахт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сергеев И.В. Исследование газообильности шахт и способов ее снижения. *Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского*. Москва, 1970: 75. Sergeyev I.V. Investigation of gas abundance in mines and ways to reduce it. *Scientific reports of the A.A. Skochinsky IGD*. Moscow, 1970: 75. (In Russ.).
2. Слестунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В. и др. Разработка и совершенствование технологий пластовой дегазации для эффективной и безопасной отработки угольных пластов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018; 11 (СП 49): 13–22. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-13-22>.
 Slastunov S.V., Yutyaev E.P., Mazanik E.V., et al. Development and improvement of reservoir degassing technologies for efficient and safe mining of coal seams. *Mining information and analytical bulletin*. 2018; 11 (SP 49): 13–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-11-49-13-22>.
3. Золотых С.С. Заблаговременная дегазация угольных пластов как фактор повышения безопасности на шахтах Кузбасса. *Горная промышленность*. 2019; 5: 18–22. <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2019-05-18-22>.
 Zolotykh S.S. Early degassing of coal seams as a factor in improving safety at Kuzbass mines. *Mining Industry*. 2019; 5: 18–22. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2019-05-18-22>.
4. Pan Y., Song Y., Luo H., et al. Coalbursts in China: Theory, practice and management. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024; 14: 1–25.
5. Преображенская Е.И., Талапкерова А.Ш., Садчиков В.А. Гидроразрыв угольного массива из подземных скважин. *Безопасность труда в промышленности*. 1976; 12: 26–28.
 Preobrazhenskaya Ye.I., Talapkerov A.Sh., Sadchikov V.A. Hydraulic fracturing of the coal massif from underground wells. *Occupational safety in industry*. 1976; 12: 26–28. (In Russ.).
6. Слестунов С.В., Понизов А.В., Садов А.П. и др. Гидрорасчленение угольных пластов для их эффективной дегазационной подготовки через подземные скважины. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020; 6: 15–25. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-15-25>.

- Slastunov S.V., Ponizov A.V., Sadov A.P., et al. Hydraulic fracturing of coal seams for their effective degassing treatment through underground wells. *Mining information and analytical bulletin*. 220; 6: 15-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-15-25>.
7. Xinhua W., Tao Z., Yufei L., et al. Mechanism of Coal Seam Permeability Enhancement and Gas Outburst Prevention under Hydraulic Fracturing Technology. *Geofluids*. 2022; 7151851: 9. <https://doi.org/10.1155/2022/7151851>.
 8. Li X., Zhou W., Hao S., et al. Prevention and Control of Coal and Gas Outburst by Directional Hydraulic Fracturing through Seams and Its Application. *ACS Omega*. 2023; 8: 41. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04737>.
 9. Руководство по дегазации угольных шахт. Москва, 1975: 189.
Guidelines for coal mine degassing. Moscow, 1975: 189. (In Russ.).
 10. Фоминых Е.И. Оценка степени дегазации выбросоопасных пластов. *Уголь*. 1976; 10: 43-48.
Fominykh E.I. Assessment of the degree of degassing of explosive formations. *Coal*. 1976; 10: 43-48. (In Russ.).
 11. Сирош М.К. Исследование режима и параметров предварительной дегазации разрабатываемых угольных пластов Кузбасса. Кемерово, 1974: 22.
Sirosh M.K. Investigation of the regime and parameters of preliminary degassing of the developed coal seams of Kuzbass. Kemerovo, 1974: 22. (In Russ.).
 12. Талапкеров А.Ш., Калякина Т.Н. Влияние природных факторов на газопроницаемость угольных пластов. Эффективные способы дегазации угольных пластов. *Труды ВостНИИ*. Кемерово, 1978: 114-119.
Talapkerov A.Sh., Kalyakina T.N. The influence of natural factors on the gas permeability of coal seams. Effective methods of degassing coal seams. *Proceedings of VostNI*. Kemerovo, 1978: 114-119. (In Russ.).
 13. Ножкин Н.В., Аниканов В.М. Гидравлическое расчленение пластов через скважины с поверхности. Москва, 1978: 38.
Nozhkin N.V., Anikanov V.M. Hydraulic separation of formations through boreholes from the surface. Moscow, 1978: 38. (In Russ.).
 14. Бирюков Ю.М., Садчиков В.А., Садчиков А.В. Управление газовыделением на горных отводах ликвидированных угольных шахт. Калининград, 2008: 186.
Biryukov Yu.M., Sadchikov V.A., Sadchikov A.V. Gas emission management at mining branches of liquidated coal mines. Kaliningrad, 2008: 186. (In Russ.).
 15. Wang C., Cao A., Xiang Z., et al. Numerical investigation of two typical outbursts in development headings: A case study in a Chinese coalfield. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2025; 17 (5): 2682-2694. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.05.028>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Николай Юрьевич Трошков –

зам. директора Кемеровского филиала АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела. Межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Кемерово, Российская Федерация; troshkoff1973@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-0672-6128>

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.04.2026

Поступила после рецензирования: 18.05.2026

Принята к публикации: 03.06.2026

ABOUT THE AUTHOR

Nikolay Yu. Troshkov –

Deputy Director Kemerovo Branch of the “Research institute of rock mechanics and mine survey – Inter-branch research center “VNIMI”, Kemerovo, Russian Federation; troshkoff1973@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-0672>

Article info

Received: 10.04.2026

Revised: 18.05.2026

Accepted: 03.06.2026