

УДК 622.261.2: 622.831.322

д.т.н. Калякин С. А.,
д.т.н. Лабинский К. Н.,
Азаматов Р. И.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗАБОЯХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ СОТРЯСАТЕЛЬНОМ ВЗРЫВАНИИ

Изучен процесс локализации внезапного выброса угля и газа насыпными породными перемычками в забоях проводимых подготовительных горных выработок на выбросоопасных угольных пластах при сотрясательном взрывании. Определены параметры внезапного выброса и необходимые для защиты горной выработки от действия газо-угольного потока параметры защитной перемычки. Установлена необходимая толщина породной перемычки для защиты горной выработки и локализации внезапного выброса при сотрясательном взрывании в подготовительных забоях горных выработок, проводимых по смешанным выбросоопасным забоям.

Ключевые слова: аналитические исследования, газовый клатрат, газо-угольный поток, защитная породная перемычка.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Наиболее распространённым способом разрушения пород при проведении горных выработок остаётся буровзрывной, а по выбросоопасным пластам этот способ реализуется в специальном режиме сотрясательного взрывания. Этот вид взрывных работ позволяет проводить подготовительные горные выработки сравнительно безопасно и обеспечивать воспроизведение и подготовку необходимого фронта очистных работ на выбросоопасных угольных пластах. Однако правила безопасности ограничивают длину заходки по углю на выбросоопасных пластах длиной не более 2 метров, так как в противном случае резко возрастает вероятность внезапного выброса угля и газа, что может привести к повреждению крепи выработки, оборудования, интенсивным обрушениям горных пород, что в целом делает горную выработку аварийной и непригодной для эксплуатации.

Анализ ведения буровзрывных работ при сотрясательном взрывании показывает, что перспективным направлением повышения эффективности буровзрывной технологии является использование в забое специальных насыпных породных пе-

ремычек, которые искусственно создаются в процессе проведения взрывных работ управляемым отбросом разрушаемой при взрыве породы и позволяют защитить горную выработку от возможного внезапного выброса угля. Поэтому исследования по отработке параметров технологии взрывных работ, позволяющих создавать такие защитные перемычки, являются актуальными и имеют важное научное значение.

Анализ последних исследований и публикаций показал, что при внезапном выбросе угля и газа происходит крайне быстрое разрушение призабойной части массива горных пород, их отторжение и формирование газо-угольного потока, быстро движущегося по выработке. Вследствие быстроты газодинамических явлений и их разрушающего действия на оборудование, крепь горных выработок, а также возможности создавать в выработке сильные ударные волны этот процесс характеризуют как газодинамический взрыв [1]. Поэтому при сотрясательном взрывании используются паспорта БВР, которые характеризуются не только выбором ВВ, состоянием между смежными шпурами, взрываемыми с оптимальным временем замедления, но и специальными приёмами

ведения взрывных работ. Одним из таких приёмов является проектирование таких параметров взрывания врубовых и отбойных шпуров и в такой последовательности, чтобы разрушенные породы при их отбросе формировали в забое насыпные перемычки для борьбы с выбросами, провоцируемыми при сотрясательном взрывании. В настоящее время «Инструкция по применению сотрясательного взрывания в угольных шахтах Украины» [2] рассматривает только способ проведения горных выработок по выбросоопасным породам с опережающим забоем уменьшенного сечения, когда взрывные работы выполняются как в опережающем забое, так и в отстающем за ним забое в один приём. При этом необходимо, чтобы отбитая порода отстающего забоя полностью перекрыла сечение опережающего забоя. Для уменьшения интенсивности и частоты выбросов предусматривается определённая последовательность отбойки породы забоя для создания защитной породной перемычки. Вместе с тем параметры такой защитной породной перемычки в данной «Инструкции ...» на угольных шахтах не оговорены. Поэтому обоснование параметров защитных породных перемычек для локализации внезапных выбросов при сотрясательном взрывании крайне важно.

Постановка задачи. Задачей данной работы является обоснование параметров насыпных породных перемычек для локализации внезапных выбросов угля при сотрясательном взрывании в смешанных забоях подготовительных горных выработок, проводимых по выбросоопасным угольным пластам.

Изложение материала и его результаты. Наиболее легко насыпные перемычки создаются для выбросоопасных угольных пластов при проведении смешанных забоев взрыванием за один приём, когда угольный пласт находится у почвы выработки (рис. 1). При этом в первую очередь взрывают шпуровые заряды ВВ в верхней породной подрывке, которые разрушают породу и формируют над угольным пла-

стом защитную противовыбросную перемычку необходимой толщины. После этого взрывают шпуровые заряды по углю, которые могут провоцировать внезапный выброс. Однако данный выброс будет локализован защитной перемычкой. Вместе с тем следует дать обоснование необходимой толщины насыпной перемычки, исходя из объёма разрушаемых пород и «силы» возможного внезапного выброса угля и газа.

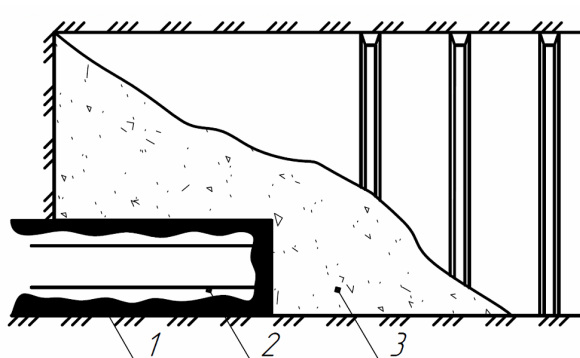
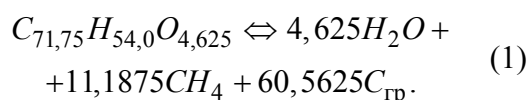


Рисунок 1 Схема формирования насыпной противовыбросной перемычки:

- 1 — угольный пласт; 2 — шпуровые заряды по углю;
3 — насыпная перемычка из разрушенной породы верхней подрывки

На начальном этапе следует оценить предельную силу внезапного выброса и обосновать параметры, которые нужны для определения необходимой толщины защитной перемычки. В соответствии с исследованиями, проведёнными в работах [3, 4], начальное состояние макромолекулы выбросоопасного угля определено его составом, химическим строением и энергией образования ($Q_{обр}$). Конечное состояние, в которое может перейти макромолекула угля, связано с разрывом связей в молекуле и образованием новых связей, сопровождающихся выделением или поглощением энергии и изменением состава. Предельный случай изменения структуры макромолекулы угля при генерации углеводородов можно описать уравнением реакции его разложения. Рассмотрим протекание физико-химического процесса механохимической перестройки макромолеку-

лы на примере угля марки Ж пласта ℓ_1 шахты им. А. Ф. Засядько, приводящего к генерации углеводородов по следующему уравнению реакции [3]:



Теплота образования угля марки Ж пласта ℓ_1 равна $Q_{обр} = 802,4$ кДж/кг. Удельная теплота, которая выделяется в результате реакции (1), равна $Q_V = 1153,54$ кДж/кг, а температура продуктов реакции $T_{пр} = 662,3$ К. Этот процесс быстротечен, и энергия реакции расходуется на преодоление сдвиговой прочности вещества угольного пласта, разрушение угля и образование газо-пылеугольного потока [3].

На основании шахтных измерений продолжительности выбросов угля и газа И. В. Бобровым [5] было установлено, что скорость разрушения угля при выбросе составляет до 10 т/с. Этот факт и уравнение разложения угольного вещества (1) позволяют определить основные газодинамические параметры выброса газа в выработку. Для описания состояния газовых включений и определения внутреннего давления в выбросоопасном угольном пласте было использовано уравнение реального газа в вириальной форме [6]. Для реальных газов при высокой плотности это уравнение имеет следующий вид:

$$P_k = NRT\rho_k(1-\varepsilon) \cdot \left(1 + \frac{b_0}{V_y} + 0,625 \frac{b_0^2}{V_y^2} + 0,287 \frac{b_0^3}{V_y^3} + 0,193 \frac{b_0^4}{V_y^4} \right), \quad (2)$$

где N — количество молей газообразных продуктов реакции;

R — газовая постоянная;

T — абсолютная температура;

ρ_k — плотность клатрата угольного пласта;

ε — относительная доля конденсированной фазы в клатрате;

b_0 — второй вириальный коэффициент для газа;

V_y — объём для «упаковки» молекул газа в клатрате угольного пласта.

Газ, заключенный в угольном клатрате, оказывает давление, направленное на разрыв клатрата изнутри. Разрыву газового клатрата препятствует давление вещающих пород и предел прочности на разрыв. Оценка устойчивости газового клатрата в угольном пласте при разрушении угля в таком случае представляет собой обобщенное условие:

$$P_k - P_z \leq [\sigma]_p, \quad (3)$$

где P_k — внутреннее давление газа в клатрате угольного пласта;

P_z — давление вмещающих пород на угольный пласт;

$[\sigma]_p$ — предел прочности угля на разрыв.

По уравнению (2) можно определить внутреннее давление газа в клатрате угольного пласта. Так, если принять плотность метастабильного газографитного клатрата после перестройки макромолекулы угля $\rho_k = 1075$ кг/м³, а абсолютную температуру угольного вещества $T = 300$ К при $\varepsilon = 0,66$ (доля конденсированной фазы), то остальные величины могут быть получены исходя из уравнения (2) и данных термодинамических свойств газов [7]. Для расчёта принято:

— удельный объём газографитного клатрата $V_k = \frac{1}{\rho_k} = 930,23$ см³/кг;

$$V_k = \frac{1}{\rho_k} = 930,23 \text{ см}^3/\text{кг};$$

— удельный объём каркаса клатрата из атомов углерода:

$$V_{y2} = 5,3 \cdot 55,2375 = 292,76 \text{ см}^3/\text{кг};$$

— удельный объём для «укладки» молекул газа в клатрате $V_y = V_k - V_{yк} = 637,47$ см³/кг;

— собственный удельный объём молекул газа:

$$b_0 = \sum b_i N_i = 33,95 \cdot 4,625 + 13,62 \cdot 5,325 + 18,63 \cdot 0,7 + 8,3 \cdot 10,4875 = 329,63 \text{ см}^3/\text{кг};$$

$$\text{– отношение } \frac{b_0}{V_y} = \frac{329,63}{637,47} = 0,517.$$

Подставляя все значения в уравнение (3), получаем внутреннее давление газа в клатрате угольного пласта:

$$P_k = 3,3481 \cdot 10^7 \text{ Па.}$$

Согласно условию (3), если происходит разгрузка пласта, напряжение, передаваемое породами на угольный пласт, снижается и стремится к нулю, тогда при выполнении условия $P_k \geq [\sigma]_p$ газовый клатрат в угольном веществе разрушается. В этом случае сплошность угольной среды нарушается и образуется газозольный поток, движущийся в направлении свободного объема выработки. Плотность этого потока (ρ_n) для адиабатического процесса истечения газа может быть определена по формуле:

$$\rho_n = \rho_k \left(\frac{[\sigma]_p}{P_k} \right)^{\frac{1}{\gamma_n}},$$

где γ_n — показатель адиабаты для смешанного метано-угольного потока, определяемый по формуле:

$$\begin{aligned} \gamma_n &= 0,66\gamma_{ep} + 0,34\gamma_r; \\ \gamma_n &= 0,66 \cdot 1,05 + 0,34 \cdot 1,342 = 1,15. \end{aligned}$$

Принимаем, что при сдвиговой деформации угольного вещества критический предел его прочности на разрыв мало отличается от сдвиговой прочности угля. Средний предел прочности на разрыв для угольного вещества $[\sigma]_p = 1,0$ МПа. Тогда плотность газозольного потока при выбросе $\rho_n = 50,68$ кг/м³. Если выброс происходит в подготовительной горной выработке, и скорость разрушения угля в пласте принять равной 10 т/с, то скорость газозольного потока (u_n) можно установить из уравнения:

$$u_n = \frac{10000}{S_{nl}\rho_n}, \text{ м/с,}$$

где S_{nl} — критическое сечение угольного пласта, через которое истекает газозольный поток: $S_{nl} = 0,5 Bm_{nl}$;

B — ширина выработки по почве пласта, м;

m_{nl} — средняя мощность пласта, м.

Для пластов средней мощности, равной 1,5 м, можно принять $S_{nl} = 4,0$ м². Тогда средняя скорость газозольного потока у забоя выработки составит:

$$u_n = 10000 / (4 \cdot 50,68) = 49,33 \text{ м/с.}$$

За единицу времени угольный поток при истечении займёт объём выработки, равный:

$$V_{зв} = S_{вч} u_n \approx 900, \text{ м}^3,$$

где $S_{вч}$ — сечение выработки в черне, м²; принято $S_{вч} = 18$ м².

Объём газа, который выделяется за это время из угольного вещества в объёме выработки, равен:

$$V_{газа} = 10 \cdot 473,48 \approx 4750 \text{ м}^3.$$

Для адиабатического процесса расширения газа его давление будет равно:

$$\begin{aligned} P_2 &= P_a \left(\frac{V_{газа}}{V_{зв}} \right)^{\gamma_2} = \\ &= 1,02 \cdot 10^5 \left(\frac{4750}{900} \right)^{1,342} \approx 10^6 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Скорость расширения газа может быть установлена из риманского решения основных уравнений гидродинамики [8]. Это решение основано на предположении, что $u_2 = \varphi(V_2)$, где V_2 — удельный объём газа, u_2 — скорость газа. Для идеального газа в работе [8] получено решение этого уравнения:

$$u_2 = u_0 + \frac{2}{\gamma_2 - 1} (C - C_0), \quad (4)$$

где u_0 — начальная скорость газа;

C — скорость звука в расширяющемся газе;

C_0 — скорость звука в невозмущенной атмосфере, $C_0 = 340$ м/с.

При истечении газа в атмосферу его скорость звука может быть найдена из выражения:

$$C = 340 \left(\frac{P_z}{P_a} \right)^{\frac{\gamma_z - 1}{2\gamma_z}} = \\ = 340 \left(\frac{10^6}{1,02 \cdot 10^5} \right)^{0,1274} = 453 \text{ м/с.}$$

По уравнению (4) находим скорость расширения газа: $u_z = 708,1$ м/с.

Скорость расширения газа сверхзвуковая, поэтому в выработке газ начнёт сжимать воздух, и в нём образуется ударная волна. Давление ударного сжатия воздуха во фронте волны равно:

$$P_{yв} = \frac{\gamma_g + 1}{2} \rho_g u_{\Gamma}^2 = \\ = \frac{1,4 + 1}{2} \cdot 1,253 \cdot 708,1^2 = 7,5 \cdot 10^5 \text{ Па,}$$

где γ_g , ρ_g — показатель адиабаты и плотность шахтного воздуха соответственно.

Скорость ударной волны в воздухе определяется по формуле

$$D_{yв} = 315,4 \left(1,46245 + \frac{P_{yв}}{P_a} \right)^{0,49305} = 925 \text{ м/с,}$$

а температура ударного сжатия газа во фронте ударной волны равна:

$$T_{\phi} = T_0 - 12,061 + 0,03436 D_{yв} + \\ + 4,4974 \cdot 10^{-4} D_{yв}^2 - 6,872 \cdot 10^{-8} D_{yв}^3 = 650 \text{ К.}$$

Результаты аналитических исследований показали, что выброс угля и газа имеет взрывоподобный характер, аналогичный взрыву, в результате которого в выработке образуется мощная ударная волна.

Таким образом, нами установлены все параметры метано-угольного потока при внезапном выбросе угля и газа. Эти пара-

метры позволяют установить объёмную плотность энергии потока, равную половине произведения плотности метано-угольного потока на квадрат скорости его движения. Для надёжной насыпной породной перемычки выбран параметр, определяющий её защитное и локализирующее действия в виде веса, определяющего её инерционные свойства при сопротивлении действию потока при внезапном выбросе:

$$P = V_n \rho_n g.$$

Тогда для локализации внезапного выброса необходимо выполнение условия, когда перемычка утилизирует всю энергию потока за счёт своих инерционных свойств. Это позволяет получить уравнение для толщины породной перемычки (Δ):

$$\Delta = m_{нл} \sqrt{\frac{\rho_{ном} u_{ном}^2 F_{нл}}{2V_n K_p K_c \rho_n g}}, \quad (5)$$

где $m_{нл}$ — мощность пласта, м;

$\rho_{пот}$ — плотность газоугольного потока при выбросе, кг/м³;

$u_{пот}$ — скорость газоугольного потока при выбросе, м/с;

$F_{пл}$ — площадь пласта, м²;

V_n — объём породной перемычки, необходимый для сопротивления выбросу, м³;

K_p — коэффициент разрыхления породы;

K_c — коэффициент трения-сцепления кусков разрушенной породы;

ρ_n — плотность породы, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с².

Для принятых условий и параметров внезапного выброса по уравнению (5) сделан расчёт толщины породной перемычки для локализации внезапного выброса угля и газа. Для приведённых выше значений параметров и длины шпуров 2 м при сотрясательном взрывании определено, что толщина породной перемычки должна быть не менее 0,5 метра. Это вполне достижимое значение толщины перемычки даже с учётом отброса породы при взрывных работах.

Формирование насыпной противовыбросной породной перемычки необходимой толщины при проведении выработок по выбросоопасным пластам может обеспечиваться использованием подвешенного экрана из отрезков конвейерной ленты, что позволит предотвратить чрезмерный разлет породы при разрушении верхней породной подрывки. При этом необходимо учитывать достаточность объёма разрушаемой породы с учётом коэффициента её разрыхления при разрушении взрывом для формирования перемычки необходимой толщины.

Выводы и направление дальнейших исследований. В результате изучения процесса газодинамических явлений на выбросоопасных угольных пластах определены основные параметры внезапного выброса и необходимые для защиты горной

выработки от действия газо-угольного потока параметры защитной перемычки.

Предложена последовательность взрывания шпуров в смешанном забое при сотрясательном взрывании, предусматривающая первоочередное взрывание пород верхней подрывки для создания защитной насыпной породной перемычки необходимой толщины, позволяющей локализовать внезапный выброс угля и газа в забоях проводимых подготовительных горных выработок на выбросоопасных угольных пластах.

Дальнейшие работы необходимо проводить в направлении разработки специальных паспортов БВР в режиме сотрясательного взрывания, которые учитывают соотношение породной и угольной части забоя выработки для оптимизации объёма пород и создания надёжной защитной насыпной перемычки.

Библиографический список

1. Калякин, С. А. Оценка взрывобезопасности забоев горных выработок при выбросах и сотрясательном взрывании [Текст] / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах : сборник научных трудов. — Макеевка : Изд-во МакНИИ, 2008. — Вып. 22. — С. 39–54.
2. Инструкция по применению сотрясательного взрывания в угольных шахтах Украины [Текст]. — Макеевка : изд-во «МакНИИ-Донбасс», 1994. — 46 с.
3. Калякин, С. А. Механизм образования взрывоопасной среды и её детонации в зонах метастабильного состояния угольного вещества [Текст] / С. А. Калякин // Вести Донецкого горного института. — Донецк : Изд-во ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. — С. 27–34.
4. Калякин, С. А. Борьба со взрывами метана на выбросоопасных угольных пластах [Текст] / С. А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах : сборник научных трудов. — Макеевка : Изд-во МакНИИ, 2007. — Вып. 20. — С. 15–25.
5. Бобров, И. В. Проведение подготовительных выработок на пластах, опасных по выбросам угля и газа [Текст] / И. В. Бобров. — Макеевка : изд-во «Макеевка-Донбасс», 1959. — 200 с.
6. Розловский, А. И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами [Текст] / А. И. Розловский. — М. : Изд-во Химия, 1972. — 364 с.
7. Гурвич, Л. В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ [Текст] / Л. В. Гурвич и др. — М. : Изд-во Наука, 1978. — 496 с.
8. Ландау, Л. Д. Определение скорости истечения продуктов детонации некоторых газовых смесей [Текст] / Л. Д. Ландау, К. П. Станюкович // Собрание трудов Л. Д. Ландау. — М. : Изд-во Наука, 1969. — С. 496–498.

© Калякин С. А.

© Лабинский К. Н.

© Азаматов Р. И.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СЗПСиГ ДонНТУ Борщевским С. В., к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТУ Смекалиным Е. С.

Статья поступила в редакцию 29.05.18.

д.т.н. Калякін С. О., д.т.н. Лабінський К. М., Азаматов Р. І. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)

ЛОКАЛІЗАЦІЯ РАПТОВИХ ВИКИДІВ У ЗАБОЯХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК ПРІ СТРУСНОМУ ПІДРИВАННІ

Вивчено процес локалізації раптового викиду вугілля та газу насипними породними перемичками у забоях підготовчих гірничих виробок, що проводяться, на викидонебезпечних вугільних шарах при струсному підриванні. Визначено параметри раптового викиду та необхідні для захисту гірничої виробки від дії газо-вугільного потоку параметри захисної перемички. Встановлено необхідну товщину породної перемички для захисту гірничої виробки та локалізації раптового викиду при струсному підриванні у підготовчих вибоях гірничих виробок, що проводяться по змішаних викидонебезпечних вибоях.

Ключові слова: аналітичні дослідження, газовий клатрат, газо-вугільний потік, захисна породна перемичка.

Doctor of Tech. Sc. Kaliakin S. A., Doctor of Tech. Sc. Labinskiy K. N., Azamatov R. I. (DonNTU, Donetsk, DPR)

LOCALIZATION OF SUDDEN OUTBURST IN WORKING FACES AT SHOCK BLASTING

There has been studied the localization process of sudden coal and gas outburst by the earth-fill rock cofferdams in the preliminary face development on the outburst-prone coal seams at shock blasting. There have been determined the sudden outburst parameters and the required security jumper to protect the working face from the gas-coal flow activity. There have been determined the required cofferdam thickness and the working face protection and sudden outburst localization at shock blasting in the preliminary working face undertaken in the mixed outburst-prone face.

Key words: analytical studies, gas clathrate, gas-coal flow, security rock jumper.